ISSN 2007-2422

Tecnología y Ciencias del Agua

Número especial: inundaciones y sequía

Incluida en Thomson Reuters Science Citation Index® (ISI) • Expanded Thomson Reuters Research Alert® (ISI) • EBSCO • ProQuest • Elsevier • Redalyc

• Índice de revistas mexicanas de investigación científica y tecnológica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt)

Vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016

Tecnología y Ciencias del Agua

Comité Editorial

Consejo Editorial

Dr. Felipe I. Arreguín Cortés
Director General del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Editor en Jefe
Dr. Nahún Hamed García Villanueva
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Editor en Agua y Energía
Dr. Humberto Marengo Mogollón
Consultor

Editora en Calidad del Agua
Dra. Blanca Elena Jiménez Cisneros
Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura

Editor en Ciencias Hidroagrícolas
Dr. Óscar L. Palacios Vélez
Colegio de Postgraduados, México

Editora en Ciencias Políticas y Sociales
Dra. Jacinta Palerm Viqueira
Colegio de Postgraduados, México

Editor en Gestión del Agua
Dr. Carlos Fernández-Jáuregui
Water Assessment and Advisory-Global Network (WASA-GN)

Editor en Hidráulica
Dr. Felipe I. Arreguín Cortés
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Editor en Hidrología
Dr. Fco. Javier Aparicio Mijares
Consultor

Editor en Innovación Científica y Tecnológica
Dr. Polioptro F. Martínez Austria
Universidad de las Américas, Puebla

Secretario Técnico
M.C. Jorge Arturo Hidalgo Toledo
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Coordinación editorial y cuidado de edición: Helena Rivas López • **Asistencia editorial y diagramación editorial:** Luisa Guadalupe Ramírez Martínez • **Diseño de figuras:** Luisa Guadalupe Ramírez Martínez y Rosario Castro Rivera • **Corrección de textos en inglés:** Ellen Sue Weiss • **Coordinación del proceso de arbitraje:** Elizabeth Peña Montiel • **Seguimiento del proceso de arbitraje:** Elizabeth Peña Montiel y Bibiana Bahena Carvajal • **Diseño de logotipo y portada:** Oscar Alonso Barrón • **Diseño del formato:** Gema Alín Martínez Ocampo • **Comercialización:** Carlos Ramón Peña Montiel.

• **Dr. Adrián Pedrozo Acuña**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Alcides Juan León Méndez**, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Cuba • **Dr. Aldo Iván Ramírez Orozco**, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México • **Dr. Alejandro López Alvarado**, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile • **Dra. Alma Chávez Mejía**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Álvaro Alberto Aldama Rodríguez**, consultor, México • **Dr. Andrei S. Jouravlev**, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Chile • **Dr. Andrés Rodríguez**, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina • **Dra. Anne Margrethe Hansen Hansen**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Dr. Ariosto Aguilar Chávez**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Dr. Armando Guevara Gil**, Pontificia Universidad Católica, Perú • **Dr. Arturo Marcano**, Asociación Internacional de Ingeniería e Investigaciones Hidráulicas, Venezuela • **Dra. Aziza Akhmouch**, Organisation for Economic Cooperation and Development, Francia • **Dr. Carles Sanchis Ibor**, Universidad Politécnica de Valencia, España • **Dr. Carlos Chairez Araiza**, consultor, México • **Dr. Carlos Cruickshank Villanueva**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Carlos Díaz Delgado**, Universidad Autónoma del Estado de México • **Dr. Carlos E. Puente**, University of California, Estados Unidos • **Dr. Cleverson Vitório Andreoli**, Centro Universitário Unifae, Brasil • Dr. Daene C. McKinney, University of Texas at Austin, Estados Unidos • Dr. Daniel Murillo Licea, Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, México • **Dr. Eduardo A. Varas Castellón**, Pontificia Universidad Católica, Chile • **Dr. Emmanuel Galindo Escamilla**, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México • **Dr. Enrique Cabrera Marcet**, Universidad Politécnica de Valencia, España • **Dr. Enrique Playán Jubillar**, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España • **Dr. Eric Rendón Schneir**, Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú • **Dr. Erick R. Bandala**, Desert Research Institute, Reno, Estados Unidos • **Dr. Ernesto José González Rivas**, Universidad Central de Venezuela • **Dr. Federico Estrada**, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, España • **Dr. Fedro Zazueta Ranahan**, University of Florida, Estados Unidos • **Dr. Gerardo Buelna**, Centre de Recherche Industrielle Québec, Canadá • **Dra. Gabriela Eleonora Moeller Chávez**, Universidad Politécnica del Estado de Morelos, México • **Dr. Gueorguiev Tzatchkov Velitchko**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Ing. Héctor Garduño Velasco**, consultor, México • **M.I. Horacio Rubio Gutiérrez**, Comisión Nacional del Agua, México • **Dr. Ismael Aguilar Barajas**, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México • **Dr. Ismael Mariño Tapia**, Instituto Politécnico Nacional, México • **Dr. Ismael Piedra Cueva**, Universidad de la República, Uruguay • **Dr. Iván Obando Camino**, Universidad de Talca, Chile • **Dr. Jaime Iván Ordóñez Ordóñez**, Universidad Nacional, Bogotá, Colombia • **Dr. Joaquín Rodríguez Chaparro**, Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, España • **Dr. José Ángel Raynal Villaseñor**, Universidad de las Américas, Puebla, México • **Dr. José D. Salas**, University of Colorado, Estados Unidos • **Dr. José Joel Carrillo Rivera**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. José Luis Pimentel Equihua**, Colegio de Postgraduados, México • **José María Gómez Espín**, Universidad de Murcia, España • **M.C. Juan Andrés Martínez Álvarez**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Juan B. Valdes**, The University of Arizona, Estados Unidos • **Dr. Juan Pedro Martín Vide**, Universidad Politécnica de Cataluña, España • **Dr. Julio Kuroiwa Horiuchi**, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú • **Dr. Karim Acuña Askar**, Universidad Autónoma de Nuevo León, México • **Dra. Luciana Coutinho**, Universidade Do Minho, Portugal • **Dr. Luis F. León Vizcaíno**, Waterloo University, Canadá • **Dr. Luis Teixeira**, Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental, Uruguay • **Dra. Luisa Paré Ouellet**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Manuel Contijoch Escontria**, SAGARPA, México • **Dr. Marcos von Sperling**, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil • **Dra. María Claudia Campos Pinilla**, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia • **Dra. María Luisa Torregrosa Armentia**, Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, México • **Dra. María Rafaela de Saldanha Matos**, Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil, Portugal • **Dra. María Teresa Oré**, Pontificia Universidad Católica del Perú • **Dra. María Victoria Vélez Otálvaro**, Universidad Nacional de Colombia • **M.I. Mercedes Esperanza Ramírez Camperos**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Dr. Michel M. Rosengaus Moshinsky**, consultor, México • **Dr. Miguel A. Medina**, Duke University, Estados Unidos • **Dr. Moisés Berezowsky Verduzco**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Omar A. Miranda**, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina • **Dra. Natalia Uribe Pando**, Water Lex, Suiza • **Dr. Óscar F. Ibáñez Hernández**, consultor, México • **Dr. Paulo Salles Alfonso de Almeida**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Rafael Val Segura**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Dr. Rafael Pardo Gómez**, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba • **Dr. Ramón Domínguez Mora**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Ramón Fuentes Aguilar**, Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia, Chile • **Dr. Ramón Ma. Gutiérrez Serret**, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, España • **Ing. Raquel Duque**, Asociación Internacional de Ingeniería e Investigaciones Hidráulicas, Colombia • **Dr. Raúl Antonio Lopardo**, Instituto Nacional del Agua, Argentina • **Dr. Rodolfo Silva Casarín**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Serge Léonard Tamari Wagner**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Dr. Simón González Martínez**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Tomás Martínez Saldaña**, Colegio de Postgraduados, México • **Dr. Víctor Hugo Alcocer Yamanaka**, Comisión Nacional del Agua • **Dra. Ximena Vargas Mesa**, Universidad de Chile •

©***TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA***, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, es una publicación bimestral editada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550, teléfono +52 (777) 3 29 36 00, extensión 474, www.imta.gob.mx/tyca, fsalinas@tlaloc.imta.mx. Editor responsable, Nahún Hamed García Villanueva; Reserva de Derecho al Uso Exclusivo No. 04-2011-083111404500-203 e ISSN 2007-2422, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derechos de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Subcoordinación de Difusión y Divulgación, Lic. Francisco José Salinas Estrada, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. Fecha de la última modificación, 30 de septiembre de 2016.

La responsabilidad del contenido de los artículos corresponde exclusivamente a los autores y no necesariamente refleja la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin la previa autorización del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Tecnología y Ciencias del Agua constituye la continuidad de las revistas *Irrigación en México* (1930-1946); *Ingeniería hidráulica en México* (1947-1971); *Recursos hidráulicos* (1972-1978), e *Ingeniería hidráulica en México*, segunda época (1985-2009); *Tecnología y Ciencias del Agua*, antes *Ingeniería hidráulica en México* (2010-2011).

ISSN 2007-2422

Para comentarios a la Coordinación Editorial, dé clic aquí

Para suscripciones, dé clic aquí

Tecnología y Ciencias del Agua

Vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016

Número especial: inundaciones y sequía

Portada: (foto superior) sequía en Durango, México. La sequía es un evento natural que ocurre de manera recurrente en México, pues la mayor parte de su territorio tiene características de aridez y crecimiento urbano con patrones de consumo inadecuados. Los problemas de desabasto de agua para consumo humano tienden a agravarse, aun sin considerar los efectos de la sequía y del cambio climático. Ver el artículo "La política pública para la sequía en México: avances, necesidades y perspectivas" de Arreguín-Cortés, López-Pérez, Ortega-Gaucin e Ibañez-Hernández, pp. 63-76.

(Foto inferior) inundación del 6 de noviembre de 2007 en el Centro Histórico de la ciudad de Villahermosa, Tabasco. El número de inundaciones en el planeta, 3 713 de 1985 a 2010, y su incremento en dos veces y media de 1980 a 2012 son el producto de muchos factores, en especial problemas de ordenamiento territorial. El número de asentamientos humanos en zonas inundables crece, con los consecuentes cambios de características de las cuencas, que producen escurrimientos cada vez más difíciles de controlar. Ver el artículo "Las inundaciones en un marco de incertidumbre climática" de Arreguín-Cortés, López-Pérez y Marengo-Mogollón, pp. 5-13.

Foto: (foto superior) Oscar Alonso Barrón; (foto inferior) José Luis Martínez Ruiz.

Inundación en Villahermosa, Tabasco, México.

Foto: José Luis Martínez Ruiz.

Contenido

Contents

Inundaciones

Floods

Artículos técnicos

Technical articles

Las inundaciones en un marco de incertidumbre climática
Felipe I. Arreguín-Cortés
Mario López-Pérez
Humberto Marengo-Mogollón

Flooding in a Context of Climate Uncertainty 5
Felipe I. Arreguín-Cortés
Mario López-Pérez
Humberto Marengo-Mogollón

Modelos regionales de escurrimientos máximos instantáneos en la república mexicana
Ramón Domínguez-Mora
Maritza L. Arganis-Juárez
Humberto Guzmán-García
Eliseo Carrizosa-Elizondo
Gabriela Esquivel-Garduño
Guadalupe E. Fuentes-Mariles

Regional Models for Instant Maximum Annual Flows in Mexican Republic 15
Ramón Domínguez-Mora
Maritza L. Arganis-Juárez
Humberto Guzmán-García
Eliseo Carrizosa-Elizondo
Gabriela Esquivel-Garduño
Guadalupe E. Fuentes-Mariles

Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas
Víctor Hugo Alcocer-Yamanaka
José Manuel Rodríguez-Varela
Víctor Javier Bourguett-Ortiz
Oscar Jesús Llaguno-Guilberto
Pedro Misael Albornoz-Góngora

Methodology for Generating Flood Risk Maps in Urban Areas 33
Víctor Hugo Alcocer-Yamanaka
José Manuel Rodríguez-Varela
Víctor Javier Bourguett-Ortiz
Oscar Jesús Llaguno-Guilberto
Pedro Misael Albornoz-Góngora

Nota técnica

Technical note

La necesidad del desarrollo de servicios hidrológicos para la reducción de daños por inundaciones
Angel Luis Aldana-Valverde

The Necessity of the Development of Hydrological Services for the Reduction of Flood Damages 57
Angel Luis Aldana-Valverde

Sequía

Drought

La política pública contra la sequía en México: avances, necesidades y perspectivas
Felipe I. Arreguín-Cortés
Mario López-Pérez
David Ortega-Gaucin
Óscar Ibañez-Hernández

Public Policy against Drought in Mexico: Progress, Needs and Perspectives 63
Felipe I. Arreguín-Cortés
Mario López-Pérez
David Ortega-Gaucin
Óscar Ibañez-Hernández

Revisión histórica de las sequías en México: de la explicación divina a la incorporación de la ciencia
Judith Domínguez

Historical Review of Droughts in Mexico: From the Divine Explanation to the Incorporation of Science 77
Judith Domínguez

Ciudades y sequía en México.
La gestión del agua como estrategia crítica de mitigación
Nicolás Pineda-Pablos
Alejandro Salazar-Adams

Cities and Drought in Mexico. Water Management as a Mitigation Critical Strategy 95
Nicolás Pineda-Pablos
Alejandro Salazar-Adams

Considerations for a Research Program on Drought in Mexico
Víctor Magaña

Consideraciones para un programa de investigación de la sequía en México 115
Víctor Magaña

Formulación simplificada de un índice de sequía, empleando una distribución de probabilidad mezclada
Alfonso Gutiérrez-López
José Vargas-Baecheler
Víctor Reséndiz-Torres
Ivonne Cruz-Paz

Simplified Design of a Drought Index, Using a Mixed Probability Function 135
Alfonso Gutiérrez-López
José Vargas-Baecheler
Víctor Reséndiz-Torres
Ivonne Cruz-Paz

La sequía de la península de Yucatán
Héctor Estrada-Medina
Víctor Cobos-Gasca
José Luis Acosta-Rodríguez
Sergio Peña Fierro
Mariela Castilla-Martínez
Claudia Castillo-Carrillo
Santiago Franco-Brito
Diana López-Castillo
Mariana López-Díaz
Wendy Luna-Flores
Andrés Maldonado-Repetto
Oscar Álvarez-Rivera
José Luis Cámara-Romero
Andrés Morales-Guadrrama
Ana María Moreno-Arjona
Biiniza Pérez-Niño
Pamela Rodríguez-Lara
Rosa Linda Zapata-Luna

The Drought of the Yucatan Peninsula 151
Héctor Estrada-Medina
Víctor Cobos-Gasca
José Luis Acosta-Rodríguez
Sergio Peña Fierro
Mariela Castilla-Martínez
Claudia Castillo-Carrillo
Santiago Franco-Brito
Diana López-Castillo
Mariana López-Díaz
Wendy Luna-Flores
Andrés Maldonado-Repetto
Oscar Álvarez-Rivera
José Luis Cámara-Romero
Andrés Morales-Guadrrama
Ana María Moreno-Arjona
Biiniza Pérez-Niño
Pamela Rodríguez-Lara
Rosa Linda Zapata-Luna

Análisis tripartita de escurrimientos naturales: aplicación a la caracterización de sequías en el río Colorado
Álvaro A. Aldama

Three-Part Decomposition of Natural Flows: Application to the Colorado River Drought Characterization 167
Álvaro A. Aldama

El monitor de la sequía en México
René Lobato-Sánchez

The Drought Monitor in Mexico 197
René Lobato-Sánchez

Discusión
Guía para colaboradores

Discussion 213
Contributor's guide 215

Las inundaciones en un marco de incertidumbre climática

• Felipe I. Arreguín-Cortés • Mario López-Pérez* •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
*Autor para correspondencia

• Humberto Marengo-Mogollón •
Consultor independiente

Resumen

Arreguín-Cortés, F. I., López-Pérez, M., & Marengo-Mogollón, H. (septiembre-octubre, 2016). Las inundaciones en un marco de incertidumbre climática. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *7*(5), 5-13.

Se presentan los eventos naturales que causaron pérdidas en el planeta en el año 2015 (1060 casos), obtenidos por el Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, entre los que destacan los hidrológicos (inundaciones y movimiento de masas de tierra) y climatológicos (temperaturas extremas, sequías e incendios) por su cantidad, pero además es notable el incremento de los eventos hidrológicos en dos veces y media de 1980 a 2012. Varios factores inciden sobre el incremento de las inundaciones, de entre ellos destacan la ausencia de ordenamiento territorial y los efectos del cambio climático sobre el ciclo hidrológico. Se comentan los tipos de daños que provoca una inundación (directos, indirectos, tangibles e intangibles) y la complejidad de calcularlos. En el caso de México, se presenta un mapa de las zonas con riesgo de inundación; los costos que estos fenómenos han ocasionado de 2000 a 2014, según el Centro Nacional de Prevención de Desastres; el mapa de riesgo municipal por lluvias y ciclones tropicales en México del *Atlas de vulnerabilidad hídrica ante el cambio climático*, elaborado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, de acuerdo con los escenarios presentados por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático en 2012, y algunas reflexiones sobre la atención a estos problemas, proponiendo que se establezcan programas de control de inundaciones basados en la teoría de gestión integrada de crecidas; reducir la incertidumbre existente en materia de información hidrometeorológica, pluviográfica, de seguimiento hidrológico en ríos, y sobre todo de proyecciones climáticas; apoyar estos programas con recursos humanos altamente calificados, y revisar el funcionamiento de vertedores de presas con riesgo hidrológico.

Palabras clave: inundaciones, crecidas, cambio climático, prevención.

Abstract

Arreguín-Cortés, F. I., López-Pérez, M., & Marengo-Mogollón, H. (September-October, 2016). Flooding in a Context of Climate Uncertainty. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 7(5), 5-13.*

Losses from events occurring on the planet in the year 2015 (1060 cases) are described, obtained by the Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, among which hydrological (floods and mass movement of land) and climate (extreme temperatures, droughts occur and fires) are highlighted due to the quantity, but it is also a notable increase in hydrological events in two and a half times in the period 1980-2012. Several factors affect the increased flooding, among them are the lack of land use planning and the effects of climate change on the hydrological cycle. The types of damage that causes (direct, indirect, tangible and intangible) flood and the complexity of calculating them are discussed. In the case of Mexico, a flood risk map is presented as well as its associated costs from 2000 to 2014 according to the National Center for Disaster Prevention. Also a municipal risk map considering rain and tropical cyclones in Mexico, the Water Vulnerability to Climate Change Atlas prepared by the Mexican Water Technology Institute, according to the scenarios presented by the Intergovernmental Panel on Climate Change in 2012 and some ideas on the attention to these problems. Proposing that flood control programs should be based on the IFM programme which include reduction of uncertainty regarding hydrometeorological, pluviographic information, hydrological monitoring in rivers and especially climate projections, supporting these programs with highly qualified human resources, and addressing the dam safety operation for spillways with hydrological risk.

Keywords*: Floods, floods, climate change prevention.*

Publicado por invitación

Introducción

El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) define inundación como el rebase de los límites normales de confinamiento de una corriente u otro cuerpo de agua, o la acumulación de la misma sobre áreas que por lo general no están sumergidas. Las inundaciones incluyen las fluviales (asociadas con desbordamiento de ríos); súbitas (*flash floods*); urbanas (p. ej., las provocadas por la falla del sistema de alcantarillado); pluviales (caracterizadas porque el agua acumulada proviene de la precipitación sobre la zona afectada, no de otros lugares, como de la parte alta de la cuenca); costeras, y asociadas con deslizamientos de glaciares (IPCC 2012). Este amplio tipo de inundaciones obedece a muchos factores, no necesariamente coincidentes para cada caso, como precipitaciones, deshielo de zonas nevadas, condiciones de drenaje de las cuencas, deforestación, urbanización, falta de sistemas de drenaje apropiados o su mal manejo, inadecuada operación de presas, falla súbita de deslizamientos que obturan los ríos, mareas y ciclones tropicales; ello obliga a establecer diferentes formas de atención a sus impactos.

Del análisis de varios casos de inundación se ha concluido que lluvias intensas de larga duración en cuencas grandes se relacionan con inundaciones fluviales, mientras que en cuencas pequeñas, lluvias intensas de corta duración pueden causar inundaciones pluviales. El control de los efectos de las inundaciones se complica por el arrastre de sedimentos, rocas, árboles, espectaculares, autos, restos de puentes, y otros objetos que pueden dañar otra infraestructura dentro o cercana a los ríos o sus llanuras de inundación, zonas urbanas o de riego, o convertirse en nuevos elementos de remanso del agua.

El problema de control de inundaciones se torna más complejo, pues los factores señalados no son constantes, y en la mayoría de los países tiende a incrementarse; por ejemplo, la intensidad de precipitación o de los ciclones tropicales están siendo afectados por el cambio climático; pero también las políticas de desarrollo inadecuadas fomentan la urbanización no planeada de cuencas, o el estrechamiento de cauces de los ríos con puentes y otras obras, que reducen su capacidad de conducción.

Pérdidas generadas por las inundaciones

En la figura 1 pueden observarse las pérdidas por eventos sucedidos en todo el mundo en 2015 (1 060 casos), clasificados como geofísicos (sismos, tsunamis y actividad volcánica); meteorológicos (tormentas tropicales, extratropicales, convectivas y locales); hidrológicos (inundaciones y movimiento de masas de tierra), y climatológicos (temperaturas extremas, sequías e incendios) (Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, 2016).

Si ahora se seleccionan sólo los eventos meteorológicos, hidrológicos y climatológicos de 1980 a 2014 (ver figura 2), puede observarse el incremento de los dos primeros con el tiempo; es decir, las tormentas tropicales, extratropicales, convectivas y locales por un lado, y por el otro, las inundaciones y movimiento de masas de tierra. En la figura 3 se presenta el número relativo de eventos geofísicos e hidrológicos de 1980 a 2012, tomando como base 1980, donde se observa la tendencia señalada.

De los datos reportados por el Dartmouth Flood Observatory sobre las inundaciones ocurridas en el planeta de 1985 a 2010 (3 713 casos) (ver figura 4), puede notarse que el mayor número de ellas sucedió en zonas urbanas.

Costos de las inundaciones

Determinar los costos de las inundaciones es complicado, pues existen daños y costos directos asociados con el impacto del fenómeno en las zonas urbanas, agrícolas, industriales y comerciales; con el medio ambiente; con infraestructura, como carreteras, puentes, ferrocarriles, líneas eléctricas, acueductos, sistemas de distribución de agua potable, y tratamiento de aguas residuales, escuelas, hospitales; y con la vida misma de los habitantes; e indirectos, ligados con actividades de infraestructura, bienes o servicios afectados, como empleos perdidos de

• ISSN 2007-2422

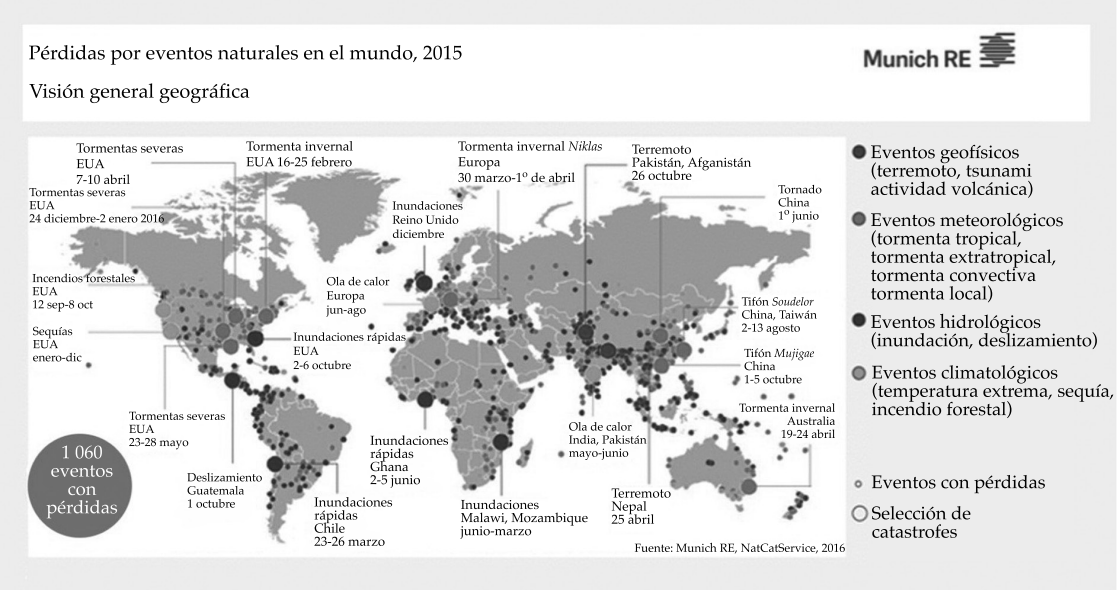


Figura 1. Pérdidas ocurridas en 2015 por eventos geofísicos, hidrológicos, meteorológicos y climatológicos. Fuente: Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, 2016.

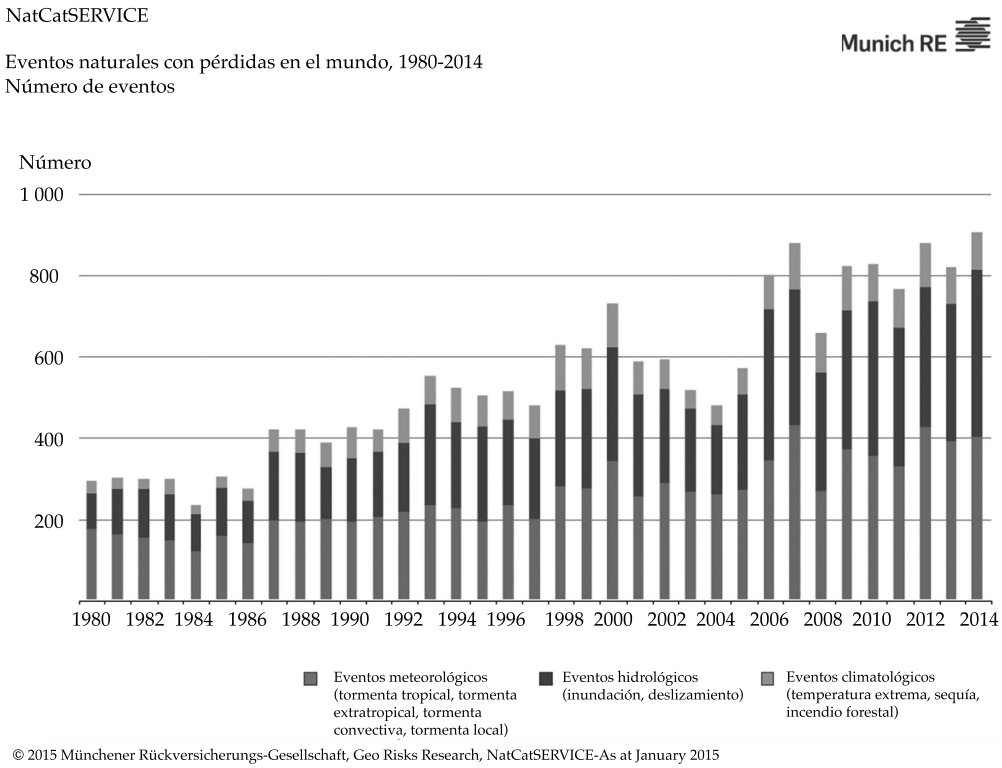


Figura 2. Eventos meteorológicos, hidrológicos y climatológicos sucedidos entre 1980 y 2014. Fuente: Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, 2016.

ISSN 2007-2422

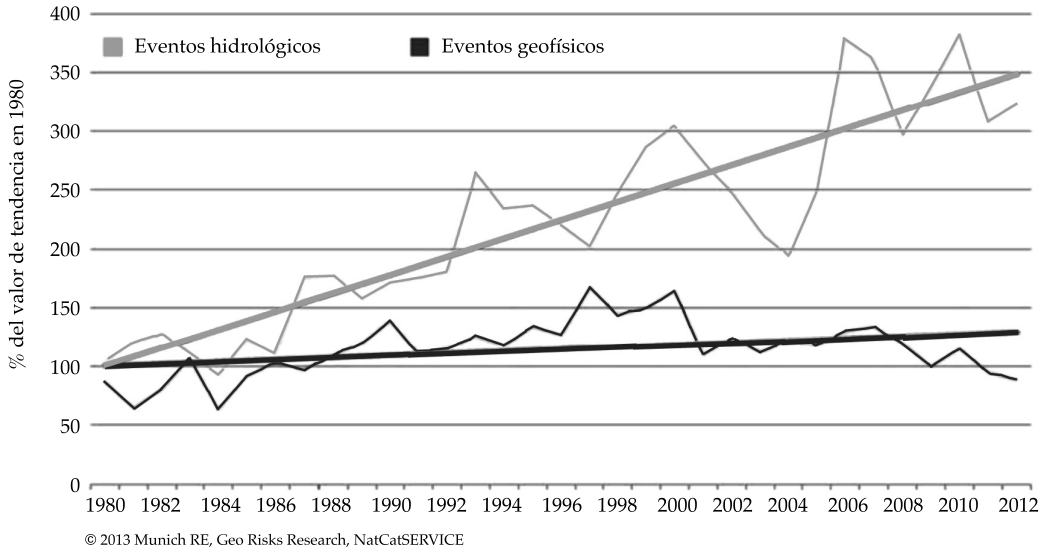


Figura 3. Número relativo de eventos geofísicos e hidrológicos de 1980 a 2012, tomando como base 1980. Fuente: Munich Re NatCatSERVICE, June, 2013.

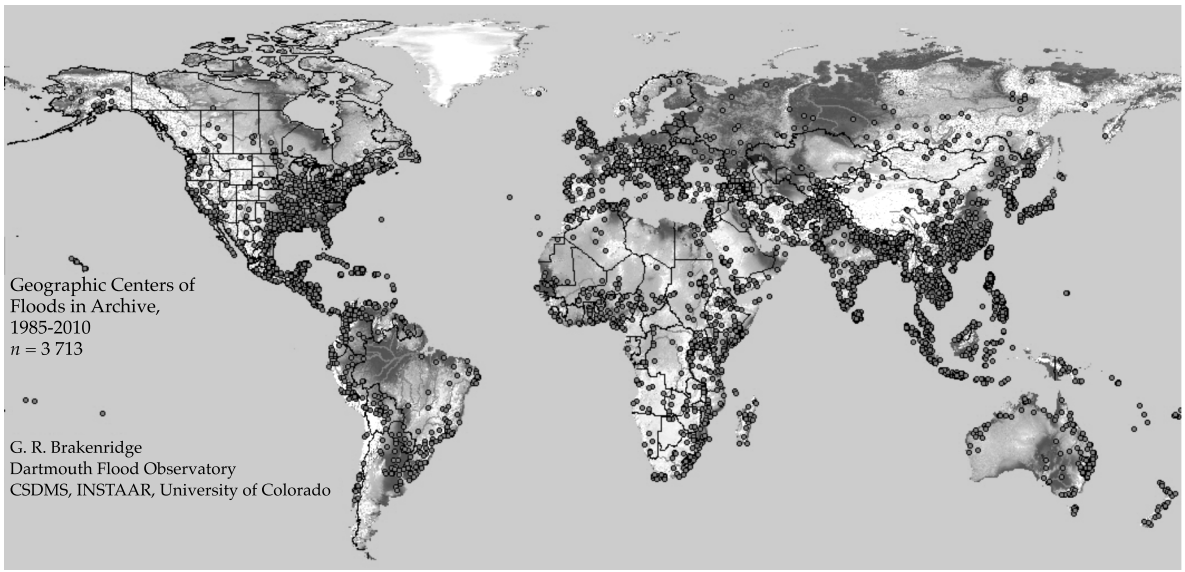


Figura 4. Inundaciones registradas de 1985 a 2010 (3 713). Fuente: Space-Based Measurement, Mapping, and Modeling of Surface Water.

forma temporal o definitiva, o actividades de las cadenas de producción.

Los costos directos e indirectos, además, incluyen impactos tangibles e intangibles, lo cual es sumamente complicado de evaluar. El caso más representativo de intangibles es la salud humana.

Existen otros enfoques para estimar los costos. Uno de ellos propone calcular los daños causados de modo directo por el fenómeno,

y sumar los costos de reducción de riesgos y mitigación (Parry *et al*., 2009).

El caso de México

Por su ubicación geográfica, México es susceptible a la presencia de eventos hidrometeorológicos extremos en el Golfo de México y el océano Pacífico. Se ha estimado que 162 000 km^2 del territorio nacional son susceptibles de inundarse (figura 5).

En la figura 6 se presentan los daños directos estimados por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred), en el país de 2000 a 2014 (Cenapred, 2015).

El desarrollo de ciudades en las planicies de inundación es histórico en todo el mundo y México no es la excepción. El aprovechamiento de la planicie tabasqueña (Arreguín & Rubio, 2014) y de las cuencas baja del río Bravo (Tamaulipas); baja del río Pánuco (Tamaulipas y Veracruz); baja del río Coatzacoalcos (Veracruz); baja del río Papaloapan (Veracruz), de la Costa de Chiapas (Chiapas); los ríos Atoyac, Jamapa, Tecolutla, Nautla y Antigua (Veracruz), la del río Tulancingo (Hidalgo), y el Valle de México, son ejemplos claros de zonas en las que pueden esperarse inundaciones frecuentes.

Un ejemplo de obturación de un cauce de un río y su posible falla repentina ocurrió en 2007, cuando hubo un deslizamiento en una ladera del río Grijalva, el segundo más caudaloso del país, que acarreó 55 millones m^3 de roca y suelo, y formó una presa natural que obstruyó el cauce del río. El tapón de 80 m de alto, 800 m de largo y 300 m de ancho se ubicó entre las presas Malpaso (aguas arriba) y Peñitas (aguas abajo). La localidad de Juan de Grijalva, situada en la margen derecha del río, fue afectada por el movimiento en bloque del terreno y por la inundación repentina de una ola, producto del deslizamiento, que provocó la muerte de 25 personas. Del material deslizado, 15 millones de metros cúbicos quedaron sobre el cauce y

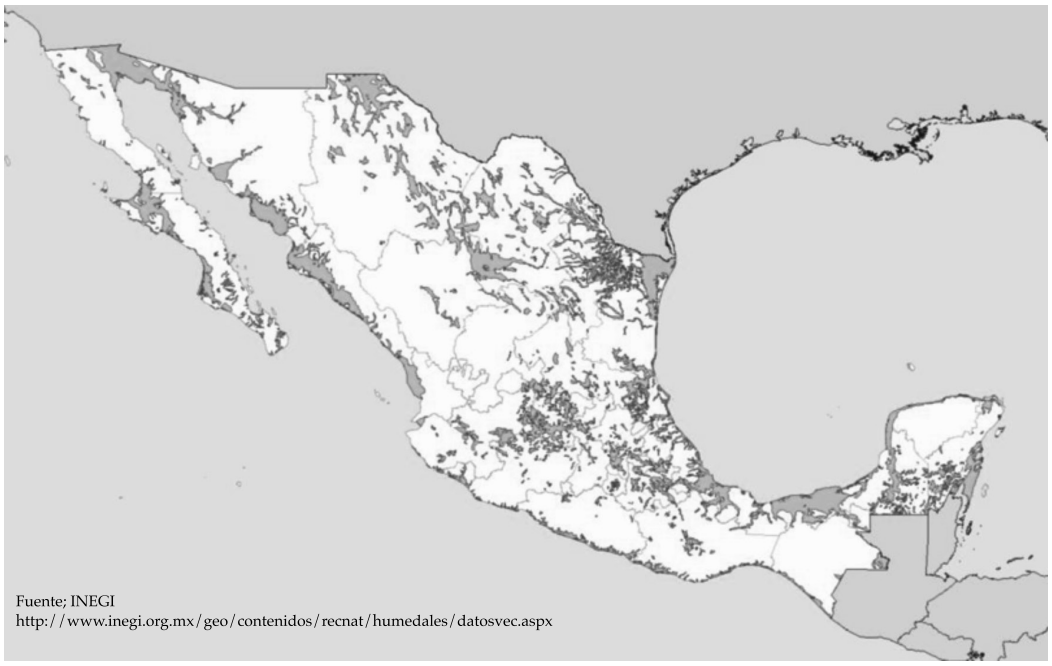


Figura 5. Humedales potenciales. Mapa que muestra la ubicación y delimitación de los principales humedales del país. Fuente: INEGI (2012), http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/humedales/datosvec.aspx.

ISSN 2007-2422

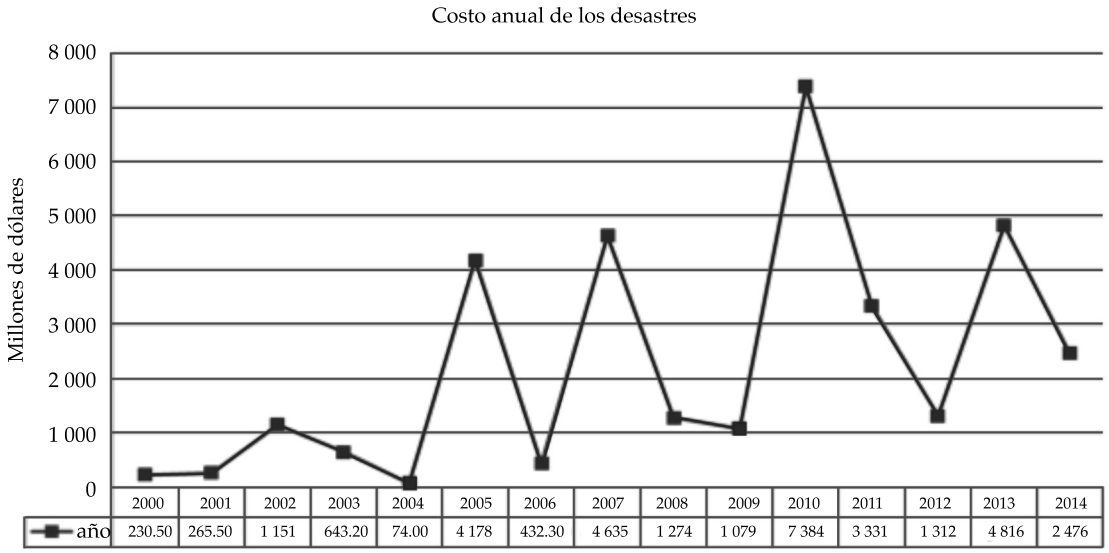


Figura 6. Costo de los daños provocados por ciclones, tormentas e inundaciones en México de 2000 a 2014.
Fuente: Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred, 2015).

obstruyeron totalmente el paso del agua. La potencial falla del obstáculo sobre el río significaba un riesgo muy grande para la presa Peñitas, y para las ciudades aguas abajo de la misma, como Villahermosa, Cárdenas, Comalcalco y Huimanguillo, Tabasco, con una población de más de tres millones de personas (figura 7).

Como ya se comentó, el cambio climático es uno de los factores que debe tomarse en cuenta en cualquier programa de prevención y reducción de vulnerabilidad. México ha actualizado su *Atlas de vulnerabilidad hídrica ante el cambio climático* (IMTA, 2015) de acuerdo con los escenarios presentados por el IPCC en 2012, estimando el riesgo municipal por lluvias y ciclones tropicales (figura 8).

Se creó el Programa Nacional de Atención a Contingencias Hidráulicas, cambiando el enfoque reactivo por uno preventivo, en el que se contemplan cuatro ejes: monitoreo, vigilancia, pronóstico y alerta temprana; determinación de zonas inundables; creación de programas de prevención de contingencias hidráulicas por organismo de cuenca, y el diseño de políticas públicas para la reducción del riesgo.

Algunas reflexiones

La relación humana con las inundaciones ha cambiado. Cada vez son más frecuentes los asentamientos en terrenos que antes no estaban poblados y en los cuales se desarrollaba el ciclo hidrológico y, en particular, el de las inundaciones.

Han variado también las inundaciones. Los cambios de uso de suelo han transformado los bosques en pastizales, zonas agrícolas o ciudades; se ha impermeabilizado el suelo; el agua que se infiltra es mucho menor, y la mayor parte escurre por las calles y sistemas de drenaje, y por último se descarga a los ríos. Esto genera un proceso complicado, que cambia el comportamiento de las inundaciones; es decir, se va transformando su ciclo.

También se ha modificado la apreciación humana alrededor de las inundaciones. Con el crecimiento de las ciudades y el entubamiento de los ríos, la población ha perdido la noción de lo que pasa con los volúmenes de agua que caen durante la lluvia, y esto complica el compromiso de la sociedad con programas de prevención.

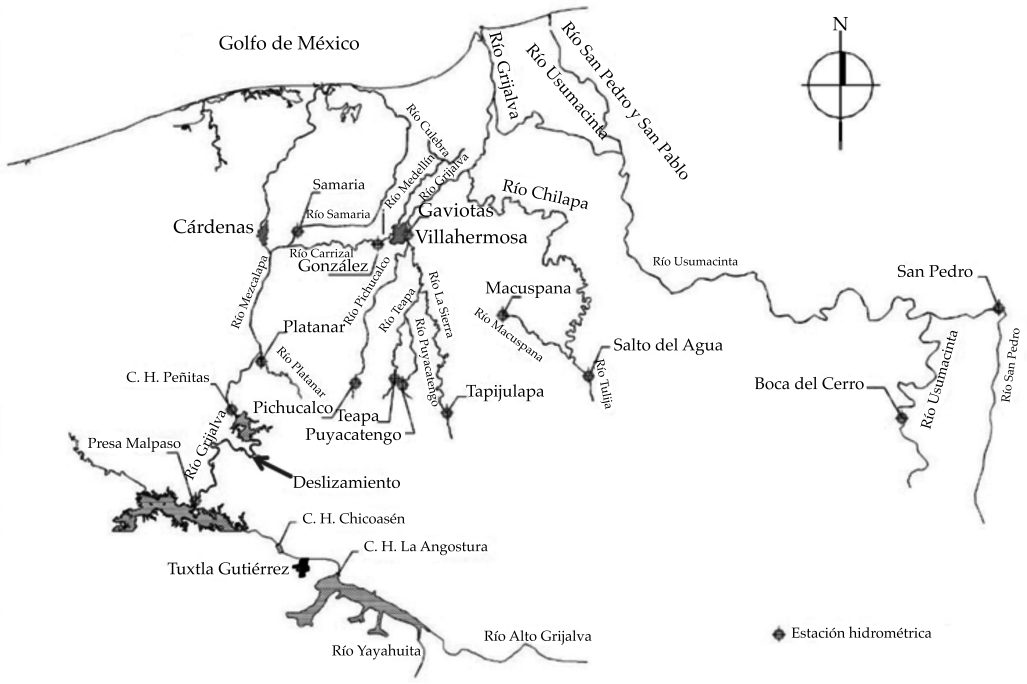


Figura 7. Sistema hidrológico del Bajo Grijalva.

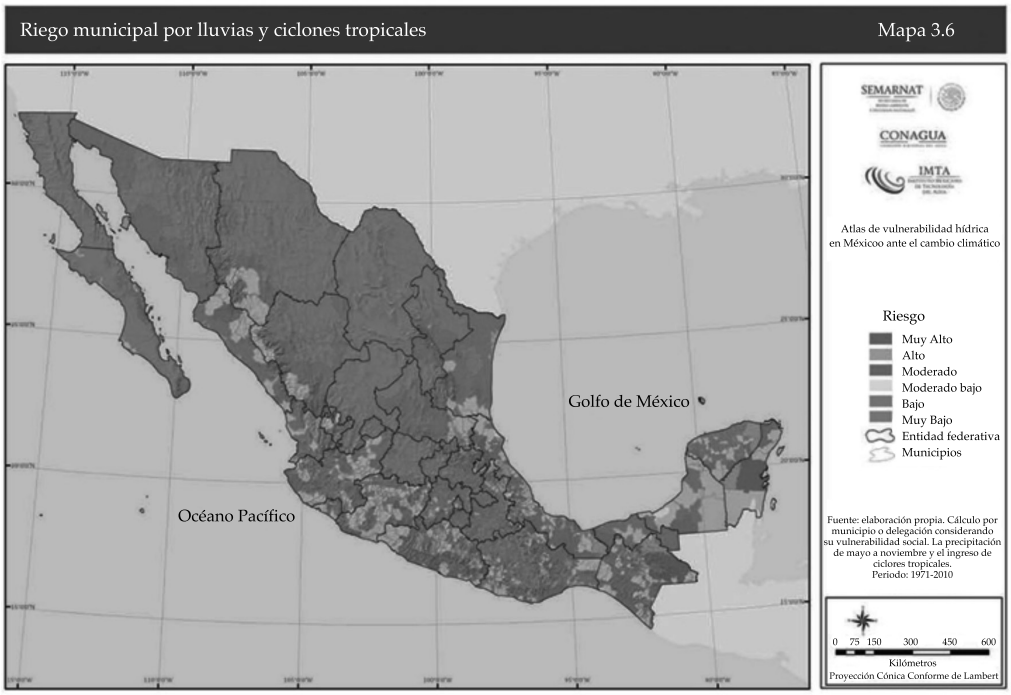


Figura 8. Riesgo municipal por lluvias y ciclones tropicales en México. Fuente: IMTA (2015).

ISSN 2007-2422

Las ciudades con riesgo de inundación requieren de una estrategia de adaptación, para garantizar asentamientos seguros frente a estos fenómenos. Por lo general se han aceptado condiciones de frontera inamovibles para las zonas en riesgo. No se aborda el problema con una visión de que las ciudades son parte de la cuenca.

La gestión integrada de crecidas tiene como finalidad maximizar los beneficios de las llanuras de inundación y reducir al mínimo las pérdidas. Es una combinación de medidas políticas, administrativas, financieras y físicas. La mejor manera de hacer frente a las inundaciones es a través de acuerdos institucionales, partiendo de la relación entre dependencias del gobierno federal, y una mejor comunicación y colaboración entre los distintos órdenes de gobierno: federal, estatal, municipal, procurando que se delimiten responsabilidades en la aplicación de planes para protección contra inundaciones.

La base de todo sistema de gestión es la información, sin embargo, la incertidumbre existente en materia de información hidrometeorológica, pluviográfica, de seguimiento hidrológico en ríos, y sobre todo de proyecciones climáticas, hace necesario contar con sistemas modernos de predicción hidrológica en tiempo real, aplicar mejores programas de ordenamiento territorial y establecer planes de desarrollo urbano que consideren crecimientos urbanos fuera de zonas de riesgo.

La participación de la sociedad para enfrentar el problema de las inundaciones es básica. Se requiere crear en la población una cultura al respecto, para lo cual es vital la comunicación social. Indemnizaciones y seguros contra afectaciones complementan los retos enunciados.

La operación de presas para el control de avenidas debe dar prioridad a la protección a centros de población; se requieren memorias técnicas, caracterizando las inundaciones desde la hidrología hasta las afectaciones, y formar un archivo histórico con bases de datos. Es impostergable la revisión del estado de conservación de vertedores de excedencias en presas con riesgo hidrológico.

Es urgente el desarrollo de capacidades. Esto incluye la formación especializada de recursos humanos, y la aplicación y desarrollo de tecnología.

El caso más urgente de atención es el Valle de México, dada su alta vulnerabilidad y relevancia social y económica. Para el país resulta de vital importancia contar con un ordenamiento territorial con una visión sustentable para el manejo del agua como factor básico de desarrollo. Una alternativa es una Procuraduría Federal del Riesgo, que fortalezca el asentamiento urbano controlado y evalúe el nivel de vulnerabilidad de las zonas por inundación, con el objeto de tomar decisiones y acciones de mitigación y adaptación.

Hay que prever las incertidumbres en la vigilancia, previsión, monitoreo y pronóstico de la lluvia (distribución espacial y temporal de la precipitación), y su transformación en escurrimiento, lo que requiere mayor investigación y estudio. En ese mismo orden de ideas, también existe incertidumbre en el seguimiento hidrológico en ríos. Las medición de niveles, velocidades y caudales en avenidas no es tan trivial, pues el monitoreo a tiempo real aún es poco confiable.

Conclusiones y recomendaciones

El número de inundaciones en el planeta, 3 713 de 1985 a 2010, y su incremento en dos veces y media de 1980 a 2012 son el producto de muchos factores, en especial problemas de ordenamiento territorial. El número de asentamientos humanos en zonas inundables crece, con los consecuentes cambios de características de las cuencas, que producen escurrimientos cada vez más difíciles de controlar.

Esta situación, aunada a los efectos que tiene el cambio climático sobre el ciclo hidrológico (incremento de la intensidad de las lluvias y pronóstico de ciclones tropicales más intensos, entre otros efectos), obliga a la construcción de programas de control de inundaciones que protejan a las poblaciones y se genere verdadera resiliencia ante estos fenómenos.

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 5-13 • ISSN 2007-2422

Los programas de control de inundaciones deben basarse en la gestión integrada de crecidas, cuya finalidad es maximizar los beneficios de las planicies de inundación y reducir al mínimo las pérdidas.

Una debilidad inicial de este tipo de programas es la incertidumbre existente en materia de información hidrometeorológica, pluviográfica, de seguimiento hidrológico en ríos, y sobre todo de proyecciones climáticas. Es necesario contar con sistemas modernos de predicción hidrológica en tiempo real y con recursos humanos calificados. Asimismo, es urgente revisar los vertedores de las presas con mayor riesgo hidrológico, pues las avenidas de diseño han sido modificadas por factores antropogénicos y los relacionados con cambio climático.

Una forma de involucrar a la sociedad sería al crear comités y comisiones de cuenca con representación de los tres órdenes de gobierno, usuarios organizados y organismos no gubernamentales con carácter multisectorial, para conocer, analizar y discutir con anticipación la información, opciones de control y mitigación de inundaciones, al igual que necesidades de formación y capacitación de dirigentes locales ante inundaciones, y sobre la atención de operación, mantenimiento y monitoreo de las obras construidas.

Referencias

Arreguín, F., & Rubio H. (mayo-junio, 2014). Análisis de las inundaciones en la planicie tabasqueña en el periodo 1995-2010. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *5*(3), 5-32.

Cenapred (2015). *Sistema Nacional de Protección Civil, 318 infografías de desastres en México. Impacto social y económico*. México, DF: Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Dartmouth Flood Observatory (2016). *Observatory Mission Statement: Space-Based Measurement, Mapping, and Modeling of Surface Water, For Research, Humanitarian, and Water Management Applications. Flood Observatory Director, Observatory Mission Statement. Community Surface Dynamics Modeling System* Boulder, USA: University of Colorado.

INEGI (2012). México, DF: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/humedales/Default.aspx.

IMTA (2015). *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. Efectos del cambio climático en el recurso hídrico de México*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

IPCC (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance, Climate Change Adaptation Special Report of the IPCC*. Cambridge: Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.

Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, Geo Risks Research (2016). *Natural catastrophe database analysis and information platform*. Munich: Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, Geo Risks Research.

Parry, M. *et al*. (2009). *Assessing the Costs of Adaptation to Climate Change: A Review of the UNFCCC and Other Recent Estimates*. London: International Institute for Environment and Development and Grantham Institute for Climate Change.

Dirección institucional de los autores

Dr. Felipe Ignacio Arreguín-Cortés

Director general
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, México
Teléfono: +52 (777) 3 28 36 00, extensión 313
felipe_arreguin@tlaloc.imta.mx

M.C. Mario López-Pérez

Coordinador de Hidrología
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, México
Teléfono: +52 (777) 3 28 36 00, extensión 345
mario_lopezperez@tlaloc.imta.mx

Dr. Humberto Marengo-Mogollón

International Commission On Large Dams
Teléfono: +52 (55) 4362 7780
hmarengom@gmail.com

Haga clic aquí para escribir al autor

Inundación en Villahermosa, Tabasco, México.

Foto: José Luis Martínez Ruiz.

Modelos regionales de escurrimientos máximos instantáneos en la república mexicana

• Ramón Domínguez-Mora • Maritza L. Arganis-Juárez* •
• Humberto Guzmán-García • Eliseo Carrizosa-Elizondo •
• Gabriela Esquivel-Garduño • Guadalupe E. Fuentes-Mariles •
Universidad Nacional Autónoma de México
*Autor para correspondencia

Resumen

Domínguez-Mora, R., Arganis-Juárez, M. L., Guzmán-García, H., Carrizosa-Elizondo, E., Esquivel-Garduño, G., & Fuentes-Mariles, G. E. (septiembre-octubre, 2016). Modelos regionales de escurrimientos máximos instantáneos en la república mexicana. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *7*(5), 15-32.

En este artículo se presenta un nuevo procedimiento para la regionalización de los escurrimientos máximos instantáneos registrados en estaciones hidrométricas de las 37 regiones hidrológicas en la que se encuentra dividida la república mexicana. Las estaciones hidrométricas seleccionadas se caracterizan por medir escurrimientos de cuencas no influenciadas por la presencia de embalses o lagos de regulación. La relativa simplicidad del método permite aplicarlo en el caso de cuencas con escasa información hidrométrica, pero que cuenten con datos de precipitaciones máximas anuales, y con características fisiográficas y cinemáticas medibles, entre ellas área de la cuenca y tiempo de concentración, además de retención potencial máxima para caracterizar pérdidas. Se utiliza la media de los gastos máximos anuales (MQMIA) como concepto eje, de tal manera que al relacionarlo con características medibles en cualquier cuenca (área, tiempo de concentración, promedio espacial de la media de precipitaciones máximas anuales, retención potencial máxima), es posible estimarla de forma sencilla, aun para cuencas no aforadas; por otro lado, se agrupan estaciones homogéneas en cuanto al comportamiento estadístico de los gastos máximos anuales, para estimar factores que permiten pasar del valor de la MQMIA al correspondiente a distintos periodos de retorno.

Palabras clave: regionalización, algoritmos genéticos, escurrimiento superficial, media de los gastos máximos anuales.

Abstract

Domínguez-Mora, R., Arganis-Juárez, M. L., Guzmán-García, H., Carrizosa-Elizondo, E., Esquivel-Garduño, G., & Fuentes-Mariles, G. E. (September-October, 2016). Regional Models for Instant Maximum Annual Flows in Mexican Republic. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 7(5), 15-32.*

A new procedure for maximum annual floods regionalization in hydrometrical stations belonging to 37 hydrologic regions of the Mexican Republic is introduced in this study. The selected stations measures runoff of basins free of reservoirs or regulation lakes upstream. The relative method's simplicity allows its application in case of ungauged basins but they must have rainfall records and measurable physiographic and kinematic characteristics, for example the drained area, concentration time, besides the maximum potential soil moisture to consider the lost. The annual maximum mean inflows (MQMIA) were used as axis concept, such that relating it with measured characteristics in any basin (drained area, concentration time, annual maximum spatial mean rainfall, maximum potential soil moisture) to estimate MQMIA in a simple way is possible, even for ungauged basins; on the other hand homogeneous stations are clustered taking into account the statistical behavior of the annual maximum runoff , to get factors that transforms the value of the historical MQMIA to that one corresponding to different return periods.

Keywords: *Regionalization, genetic algorithms, surface runoff, annual maximum mean inflows.*

Recibido: 15/06/2015
Aceptado: 09/09/2015

Introducción

En la república mexicana, la información climatológica es considerablemente mayor que la hidrométrica. En 2012, México contaba con 3 817 estaciones climatológicas oficiales operadas por la Comisión Nacional del Agua (Conagua) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE), mientras que las estaciones hidrométricas con registro son 2 226 de las cuales se seleccionaron 309 con 20 o más años de registro, y cuyo funcionamiento no está alterado con obras hidráulicas (Conagua, 2014a).

La estimación de valores máximos del escurrimiento con fines de estudios hidrológicos es un importante problema por resolver. El análisis regional permite hacer agrupaciones de sitios con comportamiento hidrológico estadísticamente similar (escurrimientos, precipitaciones), con lo que se logra la construcción de registros lo más grandes posibles para obtener una función de distribución de probabilidades de toda la zona considerada (Domínguez *et al*., 2012). Por otra parte, al relacionar estos resultados con las características fisiográficas y de precipitación de las cuencas, es posible deducir datos en sitios con escasa o nula información a partir de los obtenidos en los sitios aforados (Domínguez, Arganis, Gonzáles, Carrizosa, & Guzmán, 2013).

En distintas partes del mundo se han llevado a cabo estudios de regionalización basados en diversas técnicas para agrupar cuencas, tomando en cuenta datos medidos, así como características fisiográficas, y datos de uso de suelo y climatológicos; entre ellos resaltan los trabajos de Domínguez (1983), quien propuso modificaciones a las ecuaciones de estimación del gasto a partir de características fisiográficas del *Flood Studies Report* (1975), documento valorado también por Hosking, Wallis y Wood (1985); por otra parte, Gottschalk (1985), y Nathan y McMahon (1990), identificaron cuencas regionalmente homogéneas en Suecia y Australia, respectivamente, a partir del análisis de los escurrimientos, usando estudios de componentes principales y regresiones no lineales múltiples; otros modelos de regionalización basados en técnicas estadísticas y relaciones de tipo no lineales potenciales, análisis multivariado y manejos de sistemas de información geográfica, así como validación de metodologías de regionalización son los de Domínguez (1981); Carrizosa (1997); Allasia y Avruch (2000); Erazo (2004); Cabrera, Guardado, Peláez y Gonzáles (2004); Azevedo, Demetrius y Reis (2008); Zamanillo (2008); Isik y Singh (2008); Ganancias (2010); Olguín, Rivera y Salas (2011); Luna y Domínguez (2013), y Byzedi, Saghafian, Mohammandi y Siosemarde (2014).

En este trabajo se presenta un procedimiento para obtener funciones que determinan la media del gasto máximo instantáneo anual (MQMIA) para las cuencas de una región, en función de sus características fisiográficas fácilmente medibles y de datos de precipitación. Estos resultados pueden ser aplicables después en sitios de la región que no cuenten con información de escurrimientos, pero que sí se pueden describir a partir de su fisiografía y precipitación.

Además, tomando en cuenta la similitud en las características estadísticas de los gastos máximos registrados en grupos de cuencas, se desarrolló un análisis regional que permite determinar eventos asociados con distintos periodos de retorno mediante factores regionales que multiplican a la MQMIA de las estaciones hidrométricas de cada grupo.

Metodología

Extracción de gastos instantáneos y de gastos medios diarios

La fuente oficial de datos medidos por las estaciones hidrométricas en México se encuentra en el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) de la Comisión Nacional del Agua y del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) (Conagua, 2014a); dicha base de datos cuenta con archivos con nombre "concepto regiónclavedeestación.dbf" de los que se extraen los registros para los gastos máximos instantáneos (concepto HD) y para los gastos

• ISSN 2007-2422

medios diarios (concepto DD). Se elaboró un programa codificado en Visual Basic© para la conversión de estos archivos del BANDAS a archivos de un hoja de cálculo Excel©, y que además realiza el cálculo de los gastos medios máximos para distintas duraciones y los estadísticos media, desviación estándar, variancia y coeficiente de asimetría. A dichos archivos se les inserta el registro de gastos máximos instantáneos, también obtenido con un programa desde los archivos del BANDAS. Después se realizan comparaciones entre los valores de los gastos máximos instantáneos con respecto a los gastos medios máximos de un día, y en los casos que se observen mayores los medios diarios que los instantáneos, se opta por eliminar el dato o bien se revisa la información de gastos máximos mensuales (concepto DM), que en muchas ocasiones incluye valores máximos no incluidos en el concepto HD. Por último, cuando subsiste la duda y el valor correspondiente puede ser importante, se recurre a conseguir la información original.

Cálculo de estadísticos de los gastos máximos instantáneos

Se determinan la media, variancia, desviación estándar y coeficiente de variación, además del valor máximo y mínimo del registro de gastos máximos instantáneos.

Cálculo de los atributos correspondientes a cada cuenca

Área drenada

El valor del área drenada se obtiene de la descripción de estaciones hidrométricas del BANDAS de la Conagua por ser la fuente oficial de la nación. En los casos en que no se cuenta con la información, el área drenada (figura 1) se calcula a partir de una herramienta digital del tipo Arcmap© o Arcview©, ubicando a la estación hidrométrica con sus coordenadas geográficas y utilizando la extensión GeoHMS©. En este estudio se calcularon las áreas drenadas de

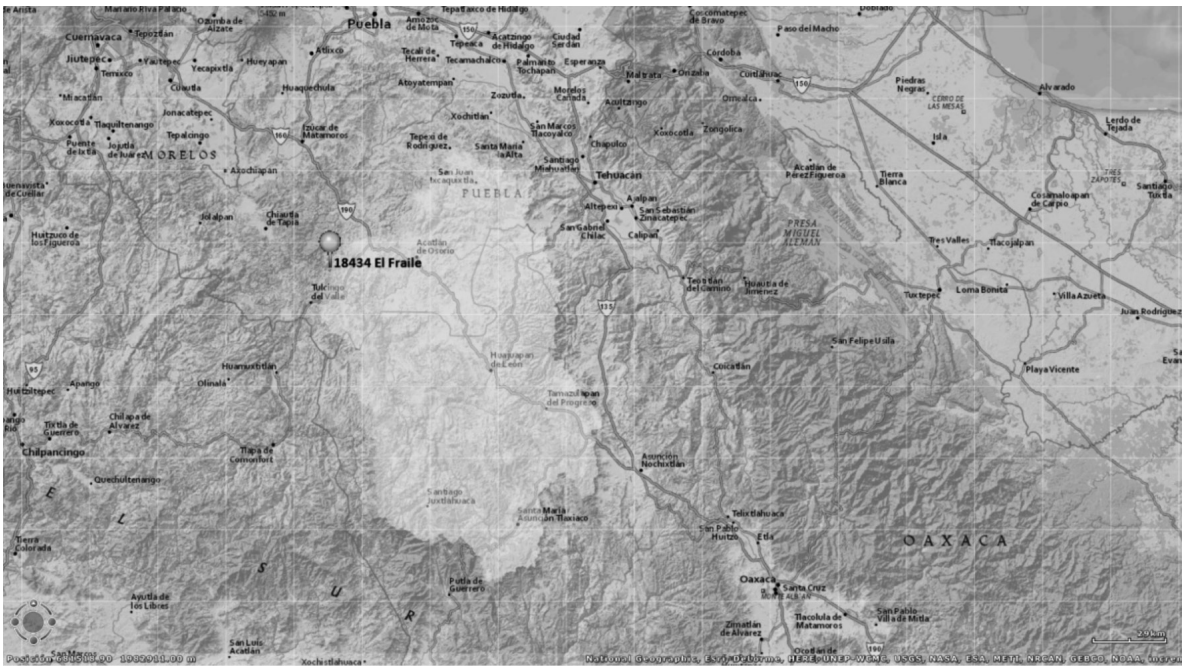


Figura 1. Área drenada. Ejemplo de la estación hidrométrica 18434 El Fraile.

ISSN 2007-2422

todas las estaciones consideradas y el resultado se verificó con el que proporciona BANDAS, de manera que si se obtenían diferencias importantes, se utilizaron los valores obtenidos con Arcview©.

Tiempo de concentración

El tiempo de concentración (*tc*) se determina con la longitud (*L*) y pendiente del cauce principal (*S*), con la ecuación experimental de Kirpich (Aparicio, 2012):

$$tc = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \qquad (1)$$

Donde *tc* en h, *L* en m y *S* en decimales es determinada con el método de la pendiente media.

Precipitación media hp

Se identifican las estaciones climatológicas ubicadas dentro o cerca de la cuenca asociada con cada estación hidrométrica analizada; se calcula la media de las precipitaciones diarias máximas anuales para cada estación climatológica y se obtiene su promedio espacial.

Número de escurrimiento N *y retención potencial máxima* S

El número *N* se determina con el tipo y uso de suelo a partir de los cuadros del US Soil Conservation Service. A partir del número de escurrimiento se obtiene el espesor de suelo *S* (infiltración potencial máxima). En Domínguez *et al*. (2008) se puede encontrar en forma detallada la determinación de *S*, dada por la ecuación (2):

$$S = \frac{2\,540 - \left((25.4 \times N\right)}{N} \qquad (2)$$

Donde *N* es el número de curva y *S* es el espesor de suelo que corresponde a la retención potencial máxima, en cm.

De la ecuación (2) se observa que el número de curva *N* depende de un solo parámetro y de acuerdo con Paz *et al*. (2010), esta particularidad lo hace atractivo para usar *N* como un método hidrológico operacional; en este estudio se utilizó la retención potencial máxima como parámetro de caracterización de las pérdidas al escurrimiento.

Agrupación de regiones

Se consideran primero cada una de las 37 regiones hidrológicas señaladas por la Conagua (figura 2).

Enseguida, se construyen gráficas de las áreas drenadas contra la media de los gastos máximos instantáneos anuales MQMIA de las estaciones hidrométricas de cada región hidrológica (o grupo de regiones hidrológicas) para establecer grupos de estaciones, con base en si sus valores de MQMIA están por arriba, por abajo o casi sobre la curva de ajuste (figura 3).

También es de utilidad para verificar la agrupación, analizar la ubicación espacial de las estaciones en esquemas topológicos, como el de la figura 4, a los que se les añade el coeficiente de variación, para observar la homogeneidad de los grupos. En el caso de la región 20, la figura muestra que la agrupación obedece al tipo de escurrimiento: si es del grupo 1, se trata de una corriente principal; el grupo 2 corresponde a ramales secundarios, y el grupo 3 a ramales terciarios.

Registros normalizados para cada grupo de estaciones hidrométricas

Los datos anuales del gasto máximo de cada estación hidrométrica se dividen entre su media y por cada grupo de estaciones hidrométricas se forma un solo registro con todos los datos normalizados, el cual se trabaja como una serie anual.

Análisis estadístico de series normalizadas

La serie anual formada por los datos normalizados de cada grupo de hidrométricas se analiza estadísticamente, ordenándolos de mayor a menor; se obtiene su periodo de retorno con

• ISSN 2007-2422

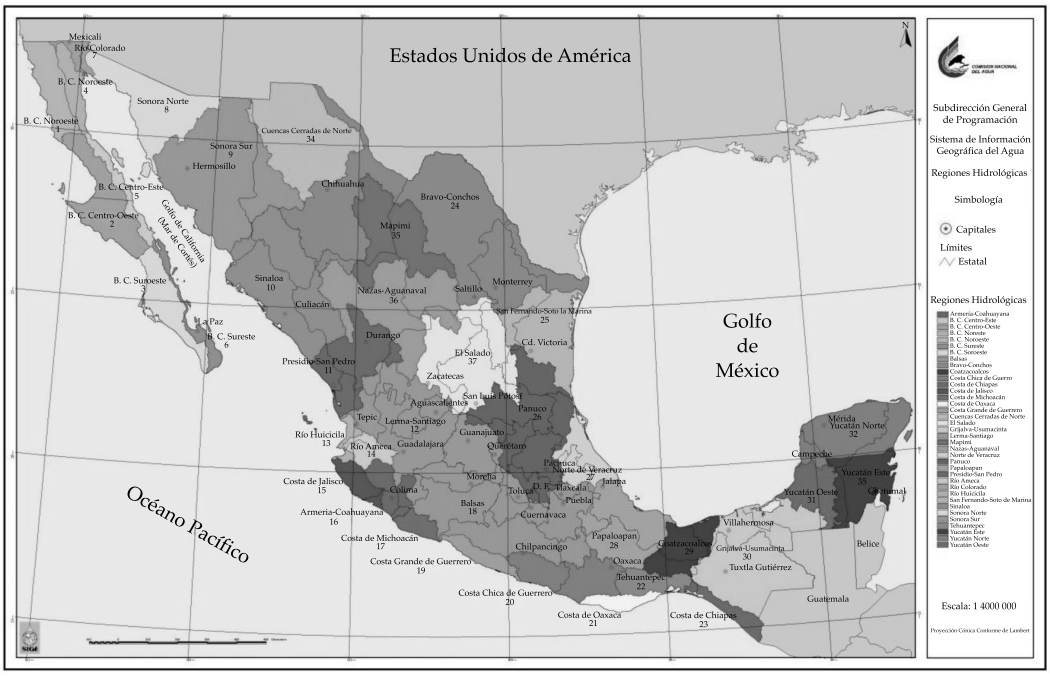


Figura 2. División del país en 37 regiones hidrológicas. Fuente: Conagua, 2014b.

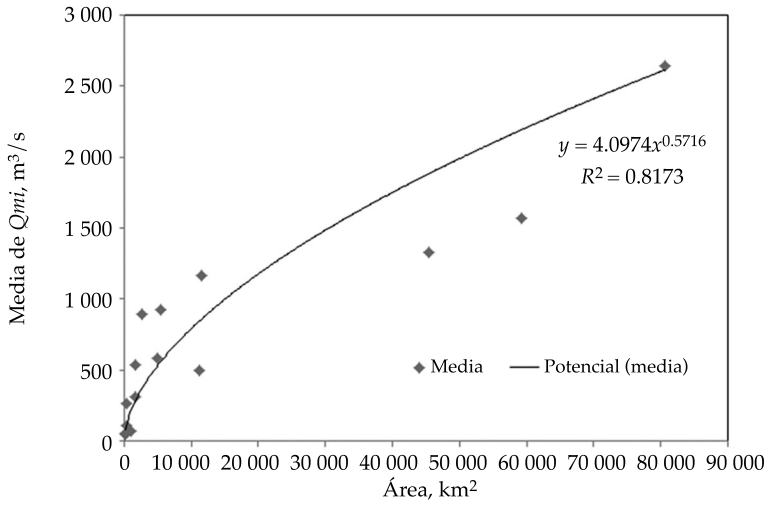


Figura 3. Ejemplo de gráfica de la MQMIA *vs*. el área drenada (RH18).

una ecuación empírica (en este caso se usó la de Weibull; Aparicio, 2012) y se hace el ajuste con distintas funciones de distribución, de las cuales se selecciona aquella que proporciona el mejor ajuste. Con la función de distribución de mejor ajuste se calculan valores de los gastos máximos instantáneos normalizados para distintos periodos de retorno.

ISSN 2007-2422

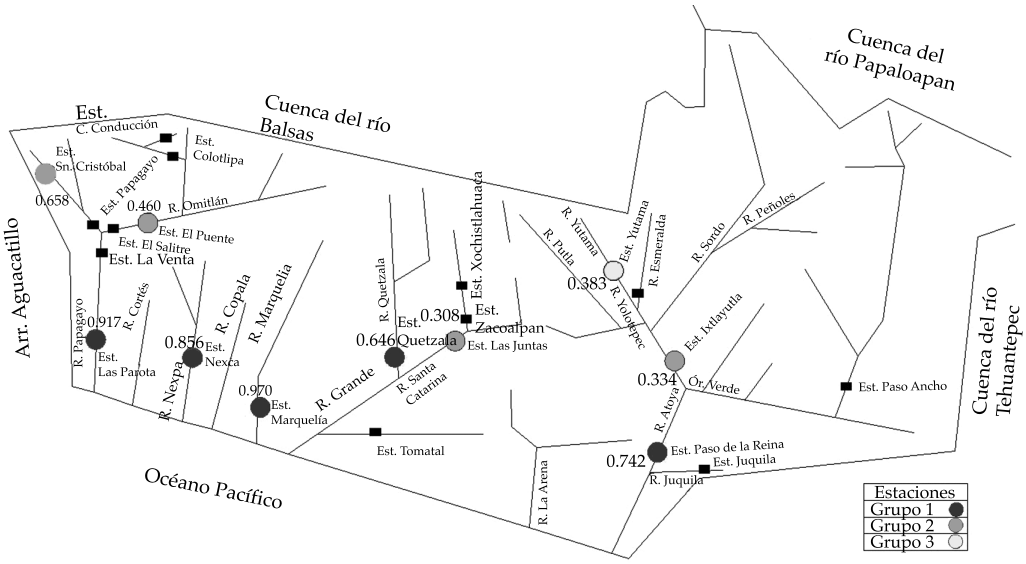


Figura 4. Ubicación de los grupos de hidrométricas. Ejemplo de una porción de la RH20.

Los valores así obtenidos para cada grupo de estaciones hidrométricas constituyen factores normalizados, de tal manera que al multiplicarlos por la MQMIA de cada estación hidrométrica del grupo correspondiente se obtiene una estimación regional de gastos máximos para distintos periodos de retorno.

Debido a que las muestras de cada grupo contienen muchos más elementos que cuando se trabaja con cada estación por separado, los resultados del análisis descrito permiten una estimación confiable de los gastos de diseño para las estaciones hidrométricas usadas en el análisis o para algunas otras que no fueron utilizadas porque su registro es corto, pero que puede considerarse suficiente para estimar la media (p. ej., cuando dicho registro es de entre 15 y 20 años). En los sitios sin registro histórico se requiere un procedimiento alternativo para estimar la media, como el que se describe a continuación.

Curvas regionales para estimar la MQMIA

Se proponen modelos no lineales de tipo potencial como los de las ecuaciones (3), (4) y (5):

$$MQMIA = C1A^{C2} \tag{3}$$

$$MQMIA = C1A^{C2}tc^{C3} \tag{4}$$

$$MQMIA = C1V^{C2}tc^{C3}S^{C4} \tag{5}$$

Donde MQMIA es la media de los gastos máximos anuales obtenida para cada estación hidrométrica de la región o grupo de regiones considerada, en m^3/s; A, el área de la cuenca, en km^2; tc, el tiempo de concentración en h; V, un indicador del volumen de precipitación en la cuenca, obtenido al multiplicar el área (km^2) por la precipitación hp (mm) (determinada como el promedio en la cuenca de la media de las precipitaciones diarias máximas anuales. El valor correspondiente a dicha precipitación, así como los valores asociados con distintos periodos de retorno y duración pueden consultarse en Domínguez, Carrizosa, Fuentes, & Galván, 2010, en la que se usó la información de poco más de dos mil estaciones pluviométricas con más de 20 años de registro), y S es la retención potencial máxima del suelo en cm.

Se determinan los parámetros $C1$, $C2$, $C3$ y $C4$ de los modelos (3), (4) y (5); para ello se

utilizaron algoritmos genéticos que son herramientas del cómputo evolutivo (Holland, 1975; Goldberg, 1989; Jiménez, 2004; Domínguez, Fuentes, Arganis, & Mendoza, 2009; Rodríguez, Arganis, Cruickshank, & Domínguez, 2012).

Selección del modelo

La selección del modelo debe hacerse tomando en cuenta la información disponible en la cuenca analizada, los coeficientes de correlación entre los datos medidos y calculados por el modelo, y la simplicidad del mismo; para la obtención de los coeficientes de correlación se construyen gráficas de los datos medidos contra los calculados por cada modelo en relación con una función identidad (figura 5).

En la figura 5, el modelo que presenta un mayor coeficiente de correlación y determinación ($r = 0.9131$ y $R^2 = 0.8338$) es el que relaciona a la MQMIA con el volumen, tiempo de concentración y espesor del suelo; este modelo considera de forma implícita al área de la cuenca y precipitación, además de procesos de infiltración y tiempo de respuesta de la cuenca al volumen llovido.

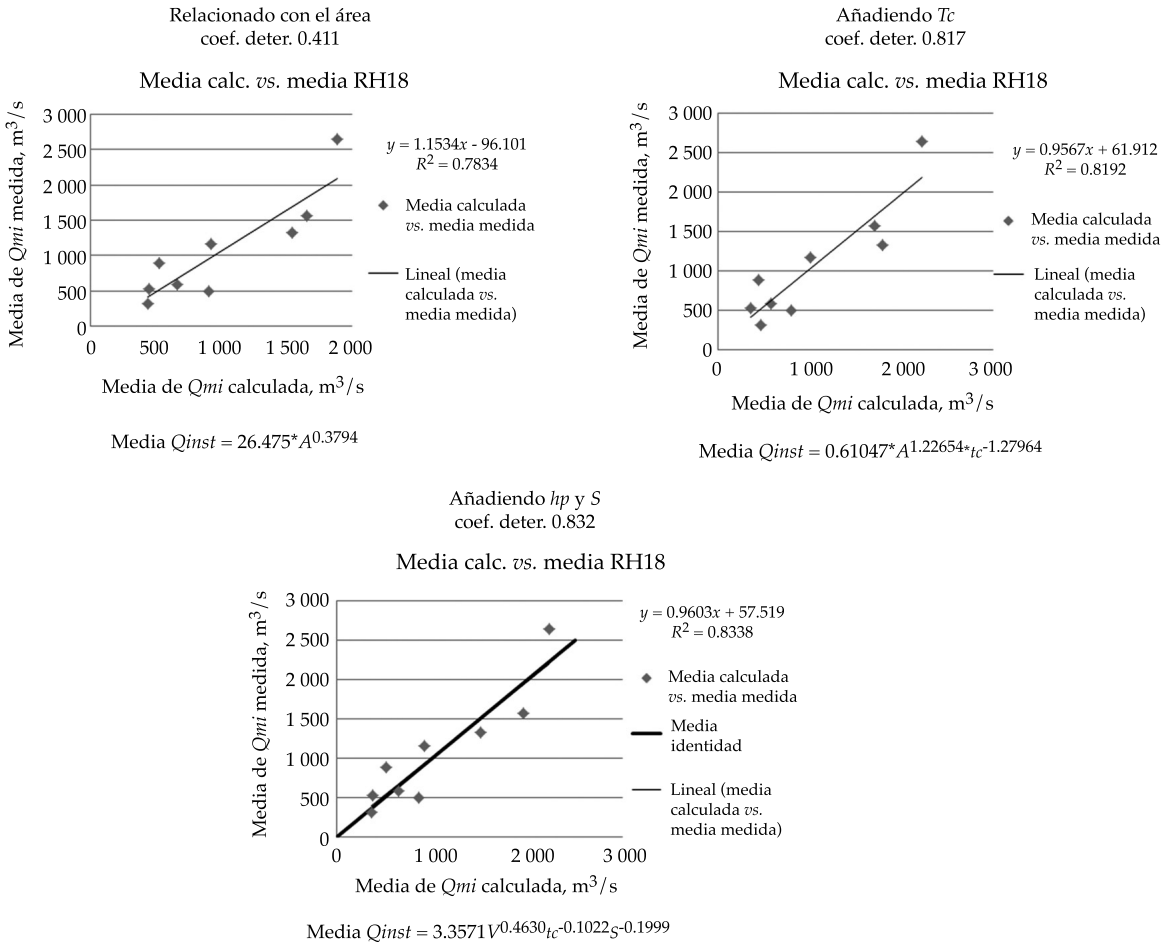


Figura 5. Ejemplo de resultados de ecuaciones regionales de la media calculada en relación con la media medida y la función identidad.

ISSN 2007-2422

Aplicación y resultados

Estimación de factores regionales para cuencas aforadas

Se escogieron 309 estaciones hidrométricas con más de 20 años de registro histórico, con la revisión ya descrita. Se procuró que dichas estaciones no estuvieran influenciadas por embalses aguas arriba. Los grupos de regiones hidrológicas se establecieron como se indica en el cuadro 1 (ver figura 2).

Para dar como ejemplo el caso de la región hidrológica 18 (RH18), con el procedimiento descrito se comparó la MQMIA contra el área de la cuenca (figura 3) y con base en esta figura se establecieron tres grupos de hidrométricas (columna 9 del cuadro 2). El grupo 1 correspondió a las estaciones que quedaban por arriba de la curva; el grupo 2, a las hidrométricas que quedaron por debajo de esa curva; el grupo 3, a los datos que quedaron aproximadamente en la curva o muy cercanas a ella.

Cuadro 1. Agrupación de regiones.

Grupos	RH
1	1 y 3
2	7 y 8
3	9
4	10
5	11
6	12
7	13 a 16 y 19
8	18
9	20 y 21
10	22
11	23
12	24
13	25
14	26
15	27
16	28 y 29
17	30
18	36 y 37

Además, en el cuadro 2 se indican los estadísticos del gasto máximo instantáneo, en particular la media y el área drenada por cada hidrométrica.

Por otro lado, se normalizó la información de los gastos máximos anuales de las estaciones correspondientes a cada grupo y se construyó un gran registro por grupo, al que se le hizo un análisis estadístico para determinar los gastos máximos instantáneos normalizados para distintos periodos de retorno (en la figura 6 se muestra la extrapolación para el grupo 1 (G1) y en el cuadro 3 se presenta el resumen de los factores extrapolados para los tres grupos (G1, G2 y G3) de la RH18).

En el cuadro 4 se muestran los factores calculados para todos los grupos.

Los valores del cuadro 4 se utilizan como factores, de manera que al multiplicarlos por la MQMIA de cada estación se obtienen las estimaciones de sus gastos máximos asociados con distintos periodos de retorno, como se muestra en el siguiente ejemplo.

Ejemplo del uso de factores para cuencas aforadas

El siguiente ejemplo tiene la finalidad de mostrar la aplicación de los resultados del cuadro 4, así como contrastar los resultados que se obtienen del análisis regional con los que se obtendrían analizando de forma individual los gastos máximos anuales de una cuenca aforada.

Si se sabe que la MQMIA histórica de la estación 18481 La Caimanera es de 2 643.804 m^3/s, y que pertenece al grupo 3 de la RH18, considerando el factor de 3.09 del cuadro 4, el gasto máximo instantáneo de diseño —correspondiente a un periodo de retorno de 50 años, considerando un análisis regional, en el que se toman en cuenta los datos de ocho estaciones— es de 2 643.804 x 3.09 = 8 166.99 m^3/s. Si se hace el análisis estadístico de los gastos máximos registrados en esa estación, sin regionalización, el gasto de diseño resulta de 11 008.09 m^3/s, obtenido con una función doble Gumbel. Es decir, la regionalización da un resultado menos

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 15-32 • ISSN 2007-2422

Cuadro 2. Grupos RH 18. Estadísticos del gasto máximo instantáneo, área drenada y agrupación de hidrométricas.

Estación	Nombre	Máximo	Media	Desv. est.	Coef. var.	Mínimo	Área, km²	Grupos
18481	La Caimanera	9 906	2 643.804	1 737.300	0.657	826	80 592.475	3
18230	Santo Tomás	3 881	1 569.484	748.473	0.477	405.21	59 153	2
18439	San Juan Tetelcingo	3 264	1 329.194	572.351	0.431	382	45 361.7	2
18434	El Fraile	1 569.74	498.872	274.995	0.551	201	11 175.5	2
18494	Los Panches	4 778	1 167.623	1 009.516	0.865	128	11 596.4	1
18459	Río Grande	136	73.696	23.224	0.315	10	943.5	3
18432	Ixcamilpa	3 210	586.302	472.631	0.806	159	4 946.6	3
18487	Los Pinzanes	5 422	924.308	896.867	0.970	146	5 525.1	1
18195	Ziritzícuaro	1 230.2	533.451	296.523	2.440	155	1 701.4	1
18201	El Cajón	1 116	264.983	242.082	0.914	28.12	395	3
18495	La Pastoría	2 873	891.102	527.682	0.592	365	2 655.9	1
18461	Zitácuaro	297.47	112.922	56.465	0.500	40.9	372.5	3
18129	Los Granjenos	258	50.957	50.421	0.989	11	171.4	3
18281	La Limonera	673.56	316.476	114.098	0.361	173	1 681.3	3
18460	Río Chiquito	875	71.904	115.542	1.607	12	247.8	3

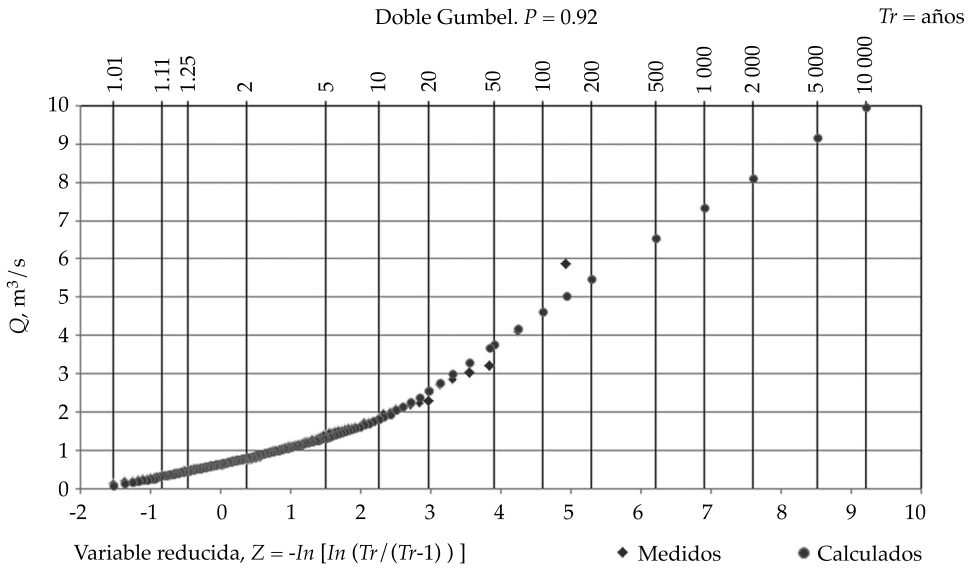


Figura 6. Ejemplo de la extrapolación probabilística para el Grupo 1 (G1) de la Región Hidrológica 18.

conservador que tomar en cuenta la cuenca en forma independiente de los sitios restantes.

Cabe mencionar que los factores del cuadro 4 pueden aplicarse para cuencas "vírgenes", aunque cuenten con un número de años de registro menor (p. ej., 15 años).

Estimación de la MQMIA en sitios no aforados

Por otra parte, con el área de la cuenca y datos de precipitación, infiltración y cinemáticos (tiempo de concentración), se obtuvieron mo-

ISSN 2007-2422

Cuadro 3. Factores de diseño normalizados.

Tr	RH 18		
	G1	G2	G3
Años			
2	0.82	0.89	0.86
5	1.34	1.31	1.27
10	1.83	1.67	1.63
20	2.56	2.02	2.14
50	3.78	2.45	3.09
100	4.64	2.75	3.82
200	5.47	3.05	4.54
500	6.54	3.43	5.45
1 000	7.34	3.73	6.14
2 000	8.12	4.02	6.83
5 000	9.18	4.4	7.74
10 000	9.96	4.7	8.41

Cuadro 4. Factores de diseño normalizado para todos los grupos de regiones.

Tr	RH 1 a 3			RH 1 (sin 3)			RH 7 y 8	RH 9		RH 10	
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G1	G2	G1	G2
Años											
2	0.32	0.49	0.53	0.32	0.42	0.33	0.73	0.83	0.77	0.68	0.88
5	1.03	1.14	1.34	1.03	0.92	0.94	1.34	1.34	1.37	1.32	1.51
10	4.16	3	2.32	4.16	3.89	3.85	1.91	1.87	2.03	2.22	1.92
20	5.89	5.57	5.19	5.89	6.12	7.86	3.18	2.45	2.87	3.42	2.32
50	7.64	8.34	8.85	7.64	8.37	11.91	6.07	3.04	3.84	4.72	2.83
100	8.86	10.29	11.29	8.86	9.93	14.73	7.99	3.43	4.51	5.61	3.22
200	10.04	12.2	13.62	10.04	11.45	17.47	9.82	3.82	5.15	6.48	3.6
500	11.58	14.68	16.64	11.58	13.43	21.04	12.16	4.31	5.99	7.6	4.1
1 000	12.74	16.55	18.91	12.74	14.93	23.71	13.92	4.68	6.62	8.44	4.49
2 000	13.9	18.43	21.13	13.9	16.42	26.43	15.66	5.05	7.25	9.27	4.87
5 000	15.4	20.84	24.11	15.4	18.34	29.97	17.91	5.55	8.06	10.39	5.37
10 000	16.54	22.68	26.33	16.54	19.89	32.61	19.62	5.92	8.68	11.27	5.75

Tr	RH 11			RH 12			RH 13 a 16 y19			RH 18		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G3
Años												
2	0.7	0.68	0.8	0.87	0.75	0.8	0.69	0.72	0.77	0.82	0.89	0.86
5	1.37	1.67	1.5	1.38	1.37	1.39	1.41	1.3	1.4	1.34	1.31	1.27
10	2.27	2.48	2.06	1.83	2.03	2.01	2.49	1.83	1.97	1.83	1.67	1.63
20	3.12	3.17	2.77	2.34	3.15	2.79	3.2	2.88	2.81	2.56	2.02	2.14
50	4.12	4.02	3.97	3	4.43	3.67	3.98	5.55	4.13	3.78	2.45	3.09
100	4.84	4.63	4.95	3.48	5.26	4.26	4.52	7.39	5.08	4.64	2.75	3.82
200	5.54	5.23	5.93	3.95	6.05	4.82	5.06	9.14	6	5.47	3.05	4.54
500	6.46	6.02	7.2	4.56	7.07	5.55	5.76	11.4	7.18	6.54	3.43	5.45
1 000	7.16	6.62	8.15	5.02	7.83	6.1	6.28	13.09	8.06	7.34	3.73	6.14
2 000	7.86	7.21	9.11	5.47	8.58	6.65	6.81	14.77	8.94	8.12	4.02	6.83
5 000	8.75	8.01	10.34	6.07	9.58	7.36	7.5	16.93	10.1	9.18	4.4	7.74
10 000	9.48	8.6	11.33	6.55	10.38	7.89	8.02	18.68	10.97	9.96	4.7	8.41

• ISSN 2007-2422

Cuadro 4 (continuación). Factores de diseño normalizado para todos los grupos de regiones.

Tr	RH 20 y 21			RH 22		RH23	RH24			RH 25	
	G1	G2	G3	G1	G2	G1	G1	G2	G3	G1	G2
Años											
2	0.79	0.82	0.86	0.65	0.7	0.84	0.65	0.54	0.74	0.81	0.57
5	1.29	1.43	1.34	1.43	1.42	1.41	1.37	1.32	1.34	1.42	1.35
10	1.93	2.06	1.77	2.17	2.18	1.89	2.31	2.05	1.85	2.02	1.99
20	2.92	2.66	2.26	3.44	3.45	2.41	3.73	3.81	2.74	2.76	2.43
50	3.57	3.25	2.9	5.53	4.95	3.09	5.22	8.45	5.45	3.69	2.93
100	3.99	3.65	3.37	6.96	5.94	3.59	6.22	11.51	7.51	4.33	3.29
200	4.38	4.04	3.83	8.33	6.87	4.08	7.18	14.39	9.47	4.95	3.65
500	4.89	4.54	4.43	10.09	8.08	4.73	8.43	18.11	11.99	5.76	4.11
1 000	5.28	4.91	4.88	11.41	8.98	5.21	9.35	20.89	13.87	6.36	4.46
2 000	5.66	5.28	5.33	12.72	9.88	5.7	10.3	23.68	15.75	6.96	4.81
5 000	6.16	5.77	5.93	14.41	11.06	6.35	11.5	27.33	18.23	7.75	5.26
10 000	6.54	6.16	6.37	15.77	12	6.83	12.41	30.22	20.07	8.38	5.63

Tr	RH 26 Pánuco			RH 26 Valle de México					RH 27		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G2	G3	G1	G2	G3
Años											
2	0.84	0.79	0.81	0.91	0.81	0.8	0.88	0.86	0.83	0.85	0.77
5	1.37	1.47	1.38	1.42	1.41	1.71	1.51	1.6	1.28	1.4	1.27
10	1.9	2.05	2.01	1.76	2.08	2.22	1.93	2.08	1.78	1.88	1.84
20	2.42	2.79	2.67	2.08	2.6	2.66	2.32	2.54	2.48	2.23	2.91
50	2.96	3.99	3.29	2.5	3.13	3.19	2.84	3.15	3.2	2.61	3.92
100	3.33	4.92	3.7	2.82	3.49	3.58	3.23	3.6	3.67	2.88	4.57
200	3.68	5.84	4.09	3.13	3.84	3.96	3.61	4.04	4.12	3.14	5.18
500	4.14	7.02	4.6	3.54	4.3	4.47	4.12	4.64	4.71	3.49	5.97
1 000	4.49	7.92	4.98	3.86	4.64	4.85	4.5	5.08	5.14	3.74	6.56
2 000	4.84	8.8	5.37	4.17	4.98	5.23	4.89	5.53	5.58	4	7.15
5 000	5.29	9.99	5.86	4.58	5.45	5.73	5.4	6.12	6.15	4.35	7.93
10000	5.63	10.86	6.24	4.9	5.79	6.14	5.78	6.57	6.58	4.59	8.54

Tr	RH 28			RH 30			RH 36 y 37		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3	G1	G2	G2
Años	*Q* (m³/s)	*Q* (m³/s)	*Q* (m³/s)	*Q* (m³/s)	*Q* (m³/s)	*Q* (m³/s)	*Q* (m³/s)	*Q* (m³/s)	*Q* (m³/s)
2	0.89	0.92	0.76	0.9	0.87	0.77	0.72	1.02	1.01
5	1.31	1.37	1.17	1.21	1.27	1.22	1.61	1.75	1.8
10	1.72	1.67	1.45	1.49	1.61	1.6	2.32	2.24	2.32
20	1.96	1.96	1.71	1.84	2.07	2.32	2.88	2.71	2.81
50	2.19	2.33	2.05	2.34	2.85	5.66	3.54	3.32	3.46
100	2.35	2.61	2.31	2.7	3.44	8.18	4.02	3.77	3.94
200	2.51	2.89	2.56	3.04	4.02	10.57	4.5	4.23	4.42
500	2.73	3.26	2.9	3.49	4.77	13.63	5.12	4.83	5.06
1 000	2.89	3.53	3.15	3.83	5.33	15.93	5.59	5.28	5.54
2 000	3.05	3.81	3.41	4.17	5.89	18.19	6.05	5.73	6.02
5 000	3.28	4.18	3.74	4.61	6.63	21.28	6.68	6.33	6.65
10 000	3.45	4.45	3.99	4.94	7.22	23.38	7.12	6.78	7.13

ISSN 2007-2422

delos regionales para estimar la MQMIA en función de dichas características (cuadro 5). En el cuadro 6 se presenta el coeficiente de determinación obtenido con cada modelo.

En los cuadros 5 y 6, la ecuación potencial (3) se logró usando una hoja de cálculo Excel© al dibujar la MQMIA de las hidrométricas de cada grupo de regiones contra el área de la cuenca correspondiente, y proponiendo una línea de tendencia potencial de la que se estableció su ecuación y coeficiente de determinación. El siguiente modelo fue del tipo de la ecuación (4), cuyos parámetros se definieron usando algoritmos genéticos; dicho modelo, además del área de la cuenca, considera el tiempo de concentración en la precisión de la MQMIA. En las ecuaciones del tipo (5) se consideró el volumen medio llovido (al tomar en cuenta el área de la cuenca y precipitación promedio en la cuenca, calculada con el promedio espacial y la media de las precipitaciones diarias máximas anuales, además del tiempo de concentración y efectos de infiltración en la cuenca al añadir al espesor de suelo *S*).

Cabe destacar que en el tercer modelo se agrupó el área con la precipitación y con ello se logró mejorar los coeficientes de determinación, aumentando sólo en 1 el número de parámetros que se requiere calcular.

En el caso de cuencas no aforadas y dependiendo de las características fisiográficas y los datos de precipitación, primero se debe estimar

Cuadro 5. Ecuaciones para estimar la MQMIA usando un modelo potencial y modelos no lineales a partir de *AG*.

RH	Ecuación potencial	Ecuación *AG* con *A* y *tc*	Ecuación *AG* con *V*, *tc* y *S*
1 y 3	$MQMIA = 0.0002*A^{1.7535}$	$MQMIA = 0.30529*A^{0.79293}*tc^{-0.09583}$	$MQMIA = 0.0001V^{0.3104}tc^{0.7405}S^{3.0198}$
7 y 8	$MQMIA = 142.39*A^{0.0054}$	$MQMIA = 0.30529*A^{1.60802}*tc^{-2.51320}$	$MQMIA = 877.7123V^{1.1838}tc^{-1.3504}S^{-4.4633}$
9	$MQMIA = 11.66*A^{0.4349}$	$MQMIA = 2.44158*A^{1.01968}*tc^{-1.03305}$	$MQMIA = 1.2208V^{1.2204}tc^{-0.51}S^{-3.5978}$
10	$MQMIA = 20.745*A^{0.4412}$	$MQMIA = 6.71417*A^{0.73861}*tc^{-0.52889}$	$MQMIA = 0.6105V^{0.7187}tc^{-0.3586}S^{-0.4141}$
11	$MQMIA = 5.6048*A^{0.5886}$	$MQMIA = 0.61047*A^{1.68572}*tc^{-2.10456}$	$MQMIA = 0.3053V^{1.8204}tc^{-1.3797}S^{-4.6715}$
12	$MQMIA = 0.1459*A^{0.8966}$	$MQMIA = 0.30529*A^{1.51708}*tc^{-1.73559}$	$MQMIA = 0.3053V^{1.5354}tc^{-1.3102}S^{-3.5441}$
13 a 16	$MQMIA = 1.3419*A^{0.7677}$	$MQMIA = 8.54528*A^{0.59389}*tc^{-0.18403}$	$MQMIA = 0.3053V^{1.535}4tc^{-0.1883}S^{0.1273}$
19	$MQMIA = 2.0168*A^{0.8458}$	$MQMIA = 0.30529*A^{1.23234}*tc^{-0.36103}$	$MQMIA = 0.0001V^{1.2564}tc^{0.1871}S^{0.4636}$
18	$MQMIA = 26.475*A^{0.3794}$	$MQMIA = 0.61047*A^{1.22654}*tc^{-1.27964}$	$MQMIA = 3.3571V^{0.4630}tc^{-0.1022}S^{-0.1999}$
20 y 21	$MQMIA = 11.974*A^{0.4763}$	$MQMIA = 36.01194*A^{0.20478}*tc^{0.52705}$	$MQMIA = 0.001V^{0.9165}tc^{-0.3745}S^{2.551}$
22	$MQMIA = 27.621*A^{0.3628}$	$MQMIA = 38.45342*A^{0.44545}*tc^{-0.52248}$	$MQMIA = 0.6105V^{0.5567}tc^{-0.5667}S^{0.4416}$
23	$MQMIA = 6.442*A^{0.6202}$	$MQMIA = 3.35714*A^{0.8249}*tc^{-0.36103}$	$MQMIA = 46.083V^{0.0488}tc^{-0.4575}S^{0.1926}$
24	$MQMIA = 0.256*A^{0.8301}$	$MQMIA = 0.30531*A^{1.5373}*tc^{-1.9288}$	$MQMIA = 0.3053V^{1.2622}tc^{-1.4725}S^{-1.7765}$
25	$MQMIA = 115.98*A^{0.1343}$	$MQMIA = 107.7304*A^{0.1473}*tc^{0}$	$MQMIA = 9\ 974.3645V^{0}tc^{-0.2414}S^{-1.7038}$
26 P	$MQMIA = 33.527*A^{0.3752}$	$MQMIA = 7.3245*A^{0.9372}*tc^{-1.0324}$	$MQMIA = 10.9868V^{0.8591}tc^{-0.7047}S^{-1.8973}$
26 VM	$MQMIA = 5.1785*A^{0.3734}$	$MQMIA = 11.2919*A^{0.0162}*tc^{1.0361}$	$MQMIA = 7.0194V^{0}tc^{0.9488}S^{0.2963}$
27	$MQMIA = 1.6791*A^{0.7634}$	$MQMIA = 31.7394*A^{0.2689}*tc^{0.4324}$	$MQMIA = 0.3053V^{0.445}tc^{0.4141}S^{0.5802}$
28 y 29	$MQMIA = 69.115*A^{0.3194}$	$MQMIA = 60.73193*A^{0.34651}*tc^{0}$	$MQMIA = 0.6105V^{0.492}tc^{0.2768}S^{0.1541}$
30	$MQMIA = 40.932*A^{0.3921}$	$MQMIA = 0.61047*A^{0.81301}*tc^{0.13215}$	$MQMIA = 3.6623V^{0.8805}tc^{0.1621}S^{-2.9502}$
36 y 37	$MQMIA = 18.941*A^{0.326}$	$MQMIA = 1.83121*A^{0.93387}*tc^{-0.72726}$	$MQMIA = 10\ 000V^{0.5316}tc^{-0.1279}S^{-3.6222}$

Nota: VM: Valle de México; P: Pánuco.

• ISSN 2007-2422

Cuadro 6. Coeficiente de determinación de los modelos del cuadro 5.

RH	Ecuación potencial	Ecuación *AG* con *A* y *tc*	Ecuación *AG* con *V*, *tc* y *S*
1 y 3	0.442	0.544	0.897
7 y 8	0.038	0.997	1
9	0.684	0.749	0.994
10	0.661	0.697	0.690
11	0.172	0.769	0.903
12	0.769	0.928	0.976
13 a 16	0.663	0.703	0.810
19	0.730	0.760	0.822
18	0.411	0.817	0.832
20 y 21	0.390	0.443	0.827
22	0.115	0.402	0.524
23	0.488	0.504	0.513
24	0.436	0.648	0.919
25	0.522	0.528	0.629
26 P	0.630	0.736	0.870
26 VM	0.364	0.647	0.652
27	0.259	0.365	0.454
28 y 29	0.318	0.325	0.438
30	0.571	0.864	0.940
36 y 37	0.430	0.790	0.984

Nota: VM: Valle de México; P: Pánuco.

la MQMIA utilizando las ecuaciones indicadas en el cuadro 5, y después se utilizaría el factor correspondiente a la región y grupo del sitio analizado.

En el cuadro 6 se observa que el modelo de la ecuación potencial, que sólo toma en cuenta el área, da coeficientes de determinación bajos, menores a 0.2, en las regiones agrupadas 7 y 8, y en las regiones hidrológicas 11 y 22; esto es, que en esas regiones, los parámetros *tc*, *V* y *S* deben considerarse en la estimación de la MQMIA.

Ejemplo de aplicación de la ecuación regional para la MQMIA en la RH19

En 2013 se registraron eventos de precipitación extraordinarios en Guerrero, en particular en el río La Sabana, que ocasionaron fuertes caudales. Si se toma en cuenta la ecuación regional obtenida en este estudio, la estimación de la MQMIA para la estación 19018 Tuncingo tendría una magnitud aproximada de 325 m^3/s (cuadro 7). Dicho valor se calcula al considerar que dicha hidrométrica se encuentre en la región hidrológica 19, cuya ecuación regional (figura 7) estima la MQMIA, en m^3/s, en función del volumen llovido en km^2.mm, obtenido como el producto del área de la cuenca drenada hasta el sitio de aforo, en km^2, por la media de las precipitaciones diarias máximas anuales hp en mm, el tiempo de concentración en horas y espesor del suelo *S* en cm.

Al multiplicar la MQMIA de 325 m^3/s por el valor del gasto máximo instantáneo normalizado de diseño para periodos de retorno de 50 y 100 años, obtenido a partir del análisis regional (ver cuadro 4), se determinan gastos máximos instantáneos de 1 335.70 m^3/s y 1 621.69 m^3/s, para los periodos de retorno de 50 y 100 años, respectivamente (cuadro 8).

Por otra parte, la Conagua (2013), utilizando el registro histórico de gastos máximos anuales

ISSN 2007-2422

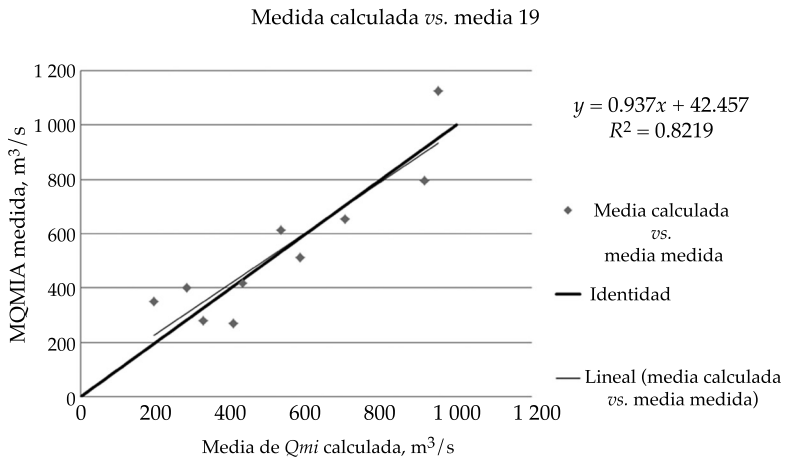


Figura 7. Ecuación regional para la RH19.

Cuadro 7. MQMIA obtenidos con la ecuación regional para la estación 19018 Tuncingo, Guerrero.

Clave	Nombre	Área km²	hp hp mm	*V* km².Mm	*tc* h	*S* espesor	MQMIA con ec. regional *AG* m³/s	Grupo RH13 a 16 y 19
19018	Tuncingo	399	127.49	50 868.51	5.44	10	324.99	3

Cuadro 8. Gastos máximos instantáneos obtenidos con análisis regional para la estación 19018 Tuncingo.

Clave	Nombre	Ajustes de MQMIA normalizados		Q de diseño m³/s	
		Tr		*Tr*	
		50 años	100 años	50 años	100 años
19018	Tuncingo	4.11	4.99	1 335.7	1 621.69

de 1969 a 2013 (este último dato estimado con la huella del agua registrado por la creciente de septiembre de 2013 ante los eventos de los huracanes *Manuel* e *Ingrid*), determinó gastos de diseño de 1 207 m³/s para el periodo de retorno de 50 años y de 1 389 m³/s para el periodo de retorno de 100 años; es decir, valores ligeramente menores a los calculados en el cuadro 8 con el estudio regional.

Además, se realizó una comparación utilizando un modelo de pronóstico de escurrimiento (MPE) (Domínguez *et al.*, 2008) para estimar el gasto máximo en el río La Sabana, a la altura de la estación hidrométrica 19018, con el evento de precipitación total de 619.33 mm ocurrido entre el 12 y 18 de septiembre de 2013 (cuadro 9 y figura 8). Al considerar los parámetros del cuadro 10, se obtuvo el hidrograma que se muestra en la figura 9, con un gasto pico de 1 419.42 m³/s, el cual corresponde al gasto máximo instantáneo comprendido entre los periodos de retorno de 50 y 100 años.

Cuadro 9. Precipitación y gastos obtenidos en el MPE.

	19018 Tuncingo, cuenca del río La Sabana	
Fecha	**hp (mm)**	***Q* total(m^3/s)**
12/09/2013 14:00	0	0
12/09/2013 20:00	17.26	0
13/09/2013 02:00	2.63	3.52
13/09/2013 08:00	0.12	5.19
13/09/2013 14:00	4.72	1.91
13/09/2013 20:00	1.16	2.88
14/09/2013 02:00	32.5	3.34
14/09/2013 08:00	35.6	61.82
14/09/2013 14:00	35.75	200.43
14/09/2013 20:00	81.1	331.45
15/09/2013 02:00	32.59	714.29
15/09/2013 08:00	87.72	776.19
15/09/2013 14:00	101.15	882.25
15/09/2013 20:00	49.7	1 419.42
16/09/2013 02:00	40.69	1 202.35
16/09/2013 08:00	20.18	688.91
16/09/2013 14:00	24.62	366.67
16/09/2013 20:00	38.55	190.39
17/09/2013 02:00	3.59	312.03
17/09/2013 08:00	9.5	240.62
17/09/2013 14:00	0.2	34.37
17/09/2013 20:00	0	4.91
18/09/2013 02:00	0	0.7

Cuadro 10. Parámetros de calibración.

Parámetros de calibración	Río La Sabana
ΔT (h)	6
λ	0.2
Fs	1
Fo	0.97
tc (h)	5
K (h)	4

Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se utilizó la media de los gastos máximos anuales (MQMIA) como concepto eje, de tal manera que al relacionarla con características medibles en cualquier cuenca (área, tiempo de concentración, promedio espacial de la media de precipitaciones máximas anuales, retención potencial máxima) es posible estimarla de forma sencilla, aun para cuencas no aforadas y, por otro lado, al multiplicarla por los factores indicados en el cuadro 4, se obtiene una estimación de los máximos

ISSN 2007-2422

Figura 8. Precipitación en la cuenca La Sabana.

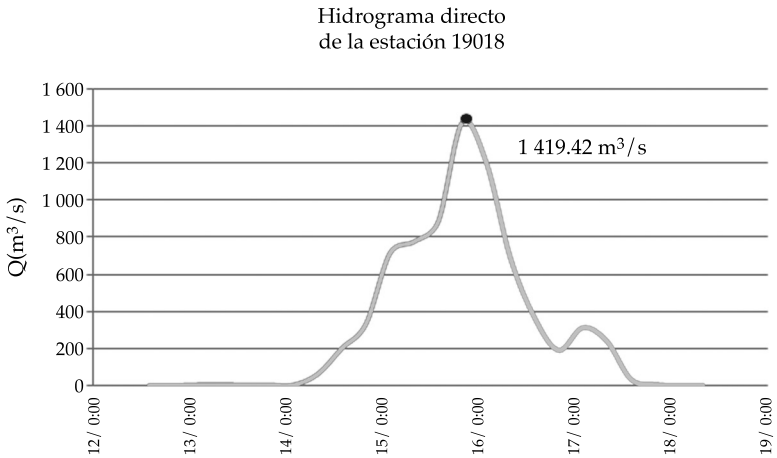


Figura 9. Hidrograma obtenido a partir de la precipitación.

instantáneos asociados con distintos periodos de retorno.

Los resultados relativos a la estimación de la MQMIA se resumen en los cuadros 5 y 6. En el primero se presentan las ecuaciones que permiten estimarla a partir de características fácilmente medibles en cuencas no aforadas, considerando tres posibles modelos de regresión.

La confiabilidad de los modelos se refleja en el coeficiente de determinación, aunque también es importante buscar su simplicidad y lógica de las variables involucradas, de tal manera que un análisis del cuadro 6 muestra que el modelo más simple (en función sólo del área de cuenca) podría aplicarse en los casos de las regiones 9, 10, 12 y 19; por otra parte, el tercer modelo (con

V, *tc* y *S*), que involucra precipitación, es el mejor en todos los casos, excepto para las regiones 7, 8, 10, 18, 23 y 26, en las que el incremento en el coeficiente de determinación es pequeño.

Por otra parte, para varios grupos de regiones se obtuvieron exponentes positivos asociados con la retención potencial máxima y/o tiempo de concentración, lo cual no parece lógico, por lo que se recomienda estudiar posibilidades, como la de acotar los valores de estos exponentes al usar la optimación vía algoritmos genéticos, así como la influencia en resultados de la correlación entre el área de las cuencas y su tiempo de concentración.

Para la estimación de los coeficientes regionales mostrados en el cuadro 4 se utilizaron 305 estaciones asociadas con cuencas "vírgenes" (es decir, no afectadas de modo sensible por zonas de regulación naturales o artificiales) y que contaran con más de 20 años de registro; sin embargo, los resultados pueden usarse para estaciones con menos años de registro (p. ej., del orden de 15 años), debido a que en esos casos no sería necesario hacer un análisis estadístico que requiera momentos de orden mayor a uno, y sólo se necesitaría estimar la media de los valores máximos anuales registrados.

Se recomienda actualizar el estudio de forma periódica (p. ej., cada cinco años, como se sugiere para la revisión de avenidas de diseño).

Asimismo, con los datos generados en este estudio (se cuenta con bases de datos para las más de 300 cuencas analizadas, que contienen valores depurados de los gastos máximos anuales instantáneos y para duraciones de 1 a 60 días, así como sus áreas, también depuradas, tiempos de concentración, numero de curva, etc.) pueden realizarse otros (p. ej., los autores de este trabajo están llevando a cabo un estudio estadístico de los coeficientes de escurrimiento). Para los investigadores interesados en el tema, se cuenta también con valores de lluvia máximos anuales para duraciones de 1 a 60 días depurados para más de dos mil estaciones, y las extrapolaciones correspondientes a diversos periodos de retorno y duración.

Referencias

Allasia, D. & Avruch, G. J. (2000). *Regionalización de caudales en la región del Alto Uruguay Río Grande do Sul – Brasil*. Corrientes, Argentina: Universidad Nacional del Nordeste, Comunicaciones Científicas y Tecnológicas.

Aparicio, M. F. (2012). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México, DF: Limusa.

Azevedo, M. F., Demetrius, D. D., & Reis, C. (2008). *Stream, Flows Regionalization in Watersheds on the Right Margin of River Araguaia and Left Margin of the River Tocantins*. XXXVII Congreso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Brazil.

Byzedi, M., Saghafian, B., Mohammadi, K., & Siosemarde, M. (2014). Regional Analysis of Streamflow Drought: A Case Study in Southwestern Iran. *Environ. Earth Sci., 71*, 2955-2972, doi: 10.1007/s 12665-013-2674-7.

Cabrera, J., Guardado, R., Peláez, R., & González, N. (2004). Regionalización hidrogeológica de la provincia Pinar del río en un SIG. *Minería y Geología, 1*(2), 24-31.

Carrizosa, E. E. (1997). *Regionalización de gastos máximos en la cuenca de la vertiente del Pacífico centro de la república mexicana. México* (147 pp.) Tesis para Maestría en Ingeniería. México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Posgrado.

Conagua (2013). *Análisis de la inundación de la región en llano largo municipio de Acapulco, Guerrero* (31 pp.). Informe. México, DF: Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos.

Conagua (2014a). *Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS)*. México, DF: Comisión Nacional del Agua. Recuperado de http://www.conagua.gob.mx/Conagua07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm.

Conagua (2014b). *Subgerencia de Información Geográfica del Agua (SIGA)*. México, DF: Comisión Nacional del Agua. Recuperado de http://siga.cna.gob.mx/mapoteca/regiones%20hidrologicas/mapareghidro.htm.

Conagua (2012). *Sistema Nacional de Información del Agua, Atlas Digital del Agua México*. México, DF: Comisión Nacional del Agua. Recuperado de http://www.conagua.gob.mx/atlas/ciclo10.html

Domínguez, M. R. (1981). *Análisis regional de tormentas y avenidas de diseño. Aplicación a la cuenca del Papaloapan, México*. Tesis de Maestría de Ingeniería. México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Postgrado.

Domínguez, M. R. (1983). Design Floods for Mixed Urban/ Rural Catchments. *Hydraulics Research Station*. Wallingford, Inglaterra, *221*(1), 1-60.

Domínguez, M. R., Carrizosa, E. E., Fuentes, M. G., & Galván, T. A. (2010). *Actualización de mapas de precipitaciones para diferentes periodos de retorno y diferentes duraciones.*

ISSN 2007-2422

Elaborado para Centro Nacional de Prevención de Desastres. México, DF: Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Domínguez, M. R., Arganis, J. M., Gonzáles, V. F., Carrizosa, E. E., & Guzmán, G. H. (2013). Regionalización de datos de escurrimientos de las regiones hidrológicas de México para la estimación de avenidas de diseño. México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería.

Domínguez, M. R., Esquivel, G. G., Baldemar, M. A., Méndez, A. B., Mendoza, R. A., Arganis, J. M. L., & Carrizosa, E. E. (2008). *Manual del Modelo Pronóstico de Escurrimiento MPE*. México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería.

Domínguez, M. R., Fuentes, M. O. A., Arganis, J. M. L., & Mendoza, R. A. (2009). Calculation of Bivariate Double Gumbel Probability Density Function Via a Genetic Algorithm: Application to Huites Dam Basin. *Journal of Flood Engineering (IFE)*, *1*(1), 41-54.

Domínguez, M. R., Arganis, J. M. L., Capella, V. A., Luna, V. J. A., Fuentes, M. O. A., Carrizosa, E. E., Peña, D. F., Carabela, H. J. C., & Reyes M. H. (2012). *Análisis estadístico. Manual de diseño de obras civiles*. México, DF: Comisión Federal de Electricidad.

Erazo, C.A. (2004). *Regionalización de caudales máximos y medios en el Salvador*. San Salvador: Servicio Hidrológico Nacional de El Salvador.

Flood Studies Report (1975). *Natural Environment Research Council* (pp. 1-5). London: Flood Studies Report.

Ganancias, M. F. (2010). *Evaluación de metodologías de regionalización hidráulica: aplicación a los caudales máximos de cuencas representadas de la región sur-oeste de la provincia de Córdoba, Argentina* (370 pp.). Tesis de Maestría en Ingeniería. Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba.

Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Reading, USA: Addison Wesley Pub. Co. Inc.

Gottschalk, L. (1985). Hydrological Regionalization of Sweden. *Hydrological Sciences- Journal-des Sciences Hydrologiques*, *30*(1), 65-83.

Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor, USA: The University of Michigan Press.

Hosking, J. R., Wallis, M. J. R., & Wood, E. F. (1985). An Appraisal of the Regional Flood Frequency Procedure in the UK Flood Studies Report. *Hydrological Sciences Journal*, *30*(1), 85-109, doi: 10.1080/02626668509490973.

Isik, S. & Singh, V. (2008). Hydrologic regionalization of watersheds in Turkey. *Journal of Hydrologic Engineering*, *13*, 824-834.

Jiménez, M. (2004). *Diseño óptimo de redes de distribución de agua potable utilizando un algoritmo genético*. Tesis de maestría en Ingeniería. México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Postgrado.

Luna, V. J. A., & Domínguez, M. R. (2013). Un método para el análisis de frecuencia regional de lluvias máximas diarias: aplicación en los Andes bolivianos. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, *21*(1), 111-124. Recuperado de: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052013000100010&lng=es&nrm=iso. ISSN 0718-3305.

Nathan, R. J., & McMahon, T. A. (1990). Identification of Homogeneous Regions for the Purposes of Regionalization. *Journal of Hydrology*, *121*, 217-238.

Olguín, G., Rivera, F., & Salas, N. (2011). Identificación de regiones hidrológicas homogéneas mediante análisis multivariado. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, *12*(3), 277-284.

Paz, P. F., Marín, S. M. I., López, B. E., Zarco, H. A., Bolañoz, G. M. A., Oropeza, M. J. L., Martínez, M. M., Palacios, V. E., & Rubiños, P. E. (2010). Elementos para el desarrollo de una hidrología operacional con sensores remotos: suelo desnudo. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *1*(2), 59-70.

Rodríguez, V. K., Arganis, J. M. L., Cruickshank, V. C., & Domínguez, M. R. (2012). Rainfall-Runoff Modelling Using Genetic Programming. *Journal of Hydroinformatics*, *14*(1), 108-121.

Zamanillo, E. (2008). *Tormentas de diseño para la provincia de Entre Ríos*. Buenos Aires: Universidad Tecnológica Nacional, Grupo de Investigación en Hidrología e Hidráulica Aplicada (GIHHA), Facultad Regional Concordia.

Dirección institucional de los autores

Dr. Ramón Domínguez-Mora
Dra. Maritza L. Arganis-Juárez
M.I. Humberto Guzmán-García
M.I. Eliseo Carrizosa-Elizondo
M.I. Gabriela Esquivel-Garduño
M.I. Guadalupe E. Fuentes-Mariles

Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Ingeniería
Circuito escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán
04510 Ciudad de México, México
RDominguezM@iingen.unam.mx
MArganisJ@iingen.unam.mx
HGuzmanGa@iingen.unam.mx
ECarrizosaE@iingen.unam.mx
GEsquivelG@iingen.unam.mx
GFuentesM@iingen.unam.mx

Haga clic aquí para escribir al autor

Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas

• Víctor Hugo Alcocer-Yamanaka •
Comisión Nacional del Agua, México

• José Manuel Rodríguez-Varela* •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
*Autor para correspondencia

• Víctor Javier Bourguett-Ortiz •
Comisión Nacional del Agua, México

• Oscar Jesús Llaguno-Guilberto • Pedro Misael Albornoz-Góngora •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Resumen

Alcocer-Yamanaka, V. H., Rodríguez-Varela, J. M., Bourguett-Ortiz, V. J., Llaguno-Guilberto, O. J., & Albornoz-Góngora, P. M. (septiembre-octubre, 2016). Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *7*(5), 33-55.

En el presente artículo se expone una metodología para la generación de mapas de riesgo que articula los mapas de peligro y vulnerabilidad por inundación. Se expone el procedimiento a realizar bajo un criterio que permite ser adaptable a distintas zonas urbanas; estos mapas son utilizados para estimar los costos por daños estructurales y de menaje de las viviendas. Se revisan distintos criterios para establecer el peligro de las inundaciones usados en varios países; consideran como base para su cálculo el tirante y la velocidad del agua alcanzados en las calles, arroyos y ríos. Asimismo, se plantean dos factores que se consideran importantes: resistencia al vuelco y deslizamiento. Para el cálculo de la vulnerabilidad de las edificaciones ante un evento de inundación, se plantea una metodología que permite con base en información generada por el INEGI y contenida en las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB), determinar los mapas de vulnerabilidad de toda una zona urbana. El caso de estudio es la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, donde se generaron los mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo por inundación con la metodología propuesta. Se generan costos estimados para el daño estructural y menaje de las viviendas; además, se desarrollaron rutas de evacuación y se revisó la localización de los refugios.

Palabras clave: mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo por inundación, resistencia al vuelco, deslizamiento.

Abstract

Alcocer-Yamanaka, V. H., Rodríguez-Varela, J. M., Bourguett-Ortiz, V. J., Llaguno-Guilberto, O. J., & Albornoz-Góngora, P. M. (September-October, 2016). Methodology for Generating Flood Risk Maps in Urban Areas. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 7(5), 33-55.*

This article presents a methodology for generating flood risk maps that articulates hazard and vulnerability maps. The methodology can be adapted to different urban areas, and the maps obtained allow to estimate structural and household damage cost. Different criteria, used in several countries, to establish danger of flood based on calculating water depth and flow velocity in streets, streams and rivers are first reviewed. Two factors that are deemed important, namely resistance to overturning and sliding are integrated into the hazard maps. A methodology based on information generated by the Mexican National Institute of Statistics and Geography (INEGI) and contained in its basic geostatistical areas (AGEBs) was developed to calculate vulnerability maps of buildings in an entire urban area. The case study was the city of Tuxtla Gutierrez, Chiapas where flood risk maps, housing vulnerability and hazard maps of the entire city were calculated. Structural and housing household damage costs were estimated, evacuation routes were identified and previously proposed shelter locations were revised.

***Keywords**: Hazard maps, flood risk and vulnerability, resistance to overturning, sliding.*

Recibido: 15/09/2015
Aceptado: 31/01/2016

Antecedentes

Ante un evento de lluvia es importante determinar, mediante alguna herramienta de cálculo, los costos derivados de los daños causados por la inundación tanto a menaje de casa y daños estructurales a casa habitación, edificios públicos y privados como deterioro de calles y puentes, pérdidas económicas a comercios e industrias, al igual que el paro en actividades académicas de la población estudiantil y hasta pérdidas de vidas humanas ocasionadas directamente por el evento de lluvia, o enfermedades producidas por la contaminación del agua, que con frecuencia se vincula con la destrucción de la infraestructura hidráulica de distribución y saneamiento del agua de la ciudad.

En esta situación, contar con una metodología que permita determinar los costos por daños generados por las inundaciones es determinante, a fin de proponer acciones que deriven en su mitigación.

El presente trabajo muestra los principales resultados generados a partir de la aplicación de una metodología propuesta por el IMTA, mediante la cual es posible obtener mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo de forma económica, y en un tiempo de cálculo accesible.

Estos tipos de mapas son una herramienta con la que es posible calcular para diferentes periodos de retorno zonas de la ciudad con potencial importante de inundación; áreas más vulnerables debido al tipo de construcción de las casas habitación; espacios en los que habita un número mayor de personas de edad avanzada, a quienes la inundación puede poner en riesgo; costos generados por daños probables de la inundación; beneficio-costo de las inversiones para mitigar los problemas de inundación; rutas de evacuación a refugios seguros para eventos de lluvia extremos; acciones estructurales y no estructurales que mitiguen los daños probables generados por una inundación.

La metodología permite que la generación de los mapas de peligro considere toda la zona urbana, con lo que se identifican colonias que presentarán problema de inundación. Para generar el mapa de peligro se plantea en la metodología el criterio que considera tirante, velocidad, esfuerzo al vuelco y deslizamiento generado por el escurrimiento de lluvia, con lo que se obtienen mapas de peligro más apegados a la realidad.

Para los mapas de vulnerabilidad se desarrolló una metodología que considera la información contenida en los AGEB del INEGI. Esto permite reducir costos y tiempos de elaboración de los mismos.

En cuanto a los mapas de riesgo, se generan a partir del mapa de peligro, como el de vulnerabilidad, y con éste es posible cuantificar el daño probable generado por lluvias de diferentes periodos de retorno.

Metodología

Para llegar a un mapa de riesgo por inundaciones en zonas urbanas es necesario determinar los siguientes mapas:

Mapa de peligro

El peligro de inundación se puede definir con base en ciertos criterios, que pueden ser tirante y velocidad del agua alcanzada en las calles, ríos o arroyos. Al desbordamiento del cauce natural de los ríos se le conoce como inundación fluvial. Cuando se debe a un escurrimiento de lluvias dentro de una zona urbana y después de saturarse el suelo, su agua excedente dura horas o días, se le denomina inundación pluvial. Existen otros fenómenos que pueden provocar una inundación, como las mareas altas, que derivan que el nivel medio del mar sea rebasado, provocando inundaciones costeras. Otros fenómenos que pueden provocar una inundación son los tsunamis o la falla de una obra hidráulica (Cenapred, 2006).

Criterios de peligro usados en diversos países

a) Criterio del Gobierno de Francia. Oficina Federal de la Economía de las Aguas, Office Fédéral de l'Economie des Eaux (OFEE, por sus siglas en francés)

• ISSN 2007-2422

La OFEE desarrolló un criterio para evaluar los peligros generados por las inundaciones basado en tres niveles: alto, medio y bajo (Loat & Petrascheck, 1997). Se define al nivel alto cuando la población está en riesgo dentro y fuera de las viviendas; en el nivel medio, la población está en riesgo fuera de las viviendas y las edificaciones pueden sufrir daños; para el nivel bajo, las edificaciones pueden sufrir daños leves, y la inundación o el arrastre de sedimentos pueden llegar a afectar el interior de las edificaciones (ver figura 1).

b) Criterio de la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos, Federal Emergency Management Agency (FEMA)

La Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos (FEMA) desarrolló un criterio para la generación de mapas de peligro (FEMA, 2009), en el que relacionan el tirante máximo h (m) con la velocidad máxima del agua v (m/s) (ver figura 2). Con base en estas relaciones establece tres rangos de peligro: zona de nivel bajo, amenaza moderada y alto nivel de amenaza. Para la zona de alto nivel de amenaza, la vida de las personas puede estar en peligro y las edificaciones pueden tener fallas estructurales. En la zona de precaución (moderada) se tienen daños a la integridad de las personas y afectaciones en las edificaciones; la zona de bajo peligro no representa una afectación a la población, pero las edificaciones pueden sufrir daños ligeros.

c) Criterio del Gobierno de Gales del Sur, New South Wales Goverment

El lugar de aplicación de este criterio fue la ciudad de Dórrigo, Australia, donde se generaron mapas de peligro con base en el criterio de profundidad y velocidad del agua, como el que se muestra en la figura 3, en el que se definen tres rangos de peligro (NSW, 2005). En el nivel alto se especifica que la evacuación por vehículos es difícil; además, los adultos tiene problemas para cruzar las calles con seguridad y existe un potencial daño estructural a las construcciones; la zona de transición depende de la condiciones del lugar; en el nivel bajo se establece que, en caso necesario, los vehículos pueden evacuar a las personas y sus posesiones, y los adultos tendrían inconvenientes para cruzar las avenidas con seguridad.

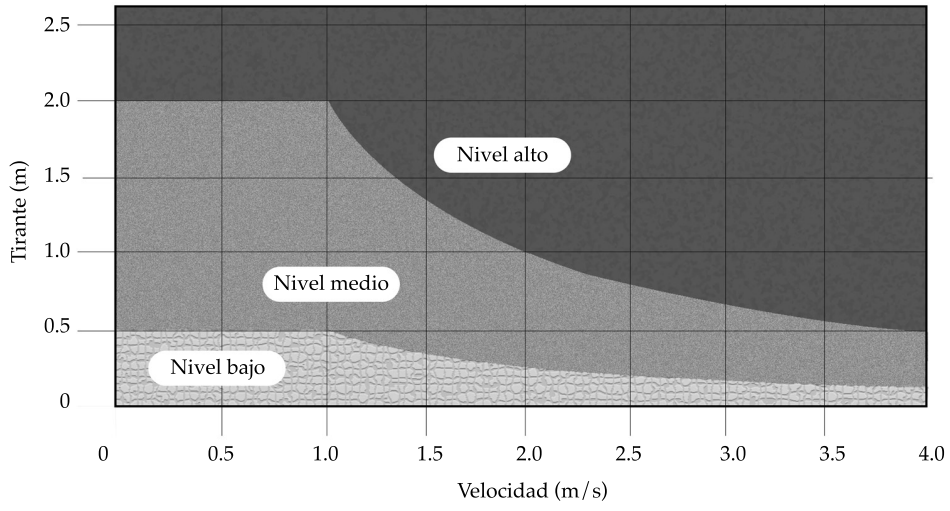


Figura 1. Nivel de peligro para inundaciones. Adaptada de Loat y Petrascheck (1997).

ISSN 2007-2422

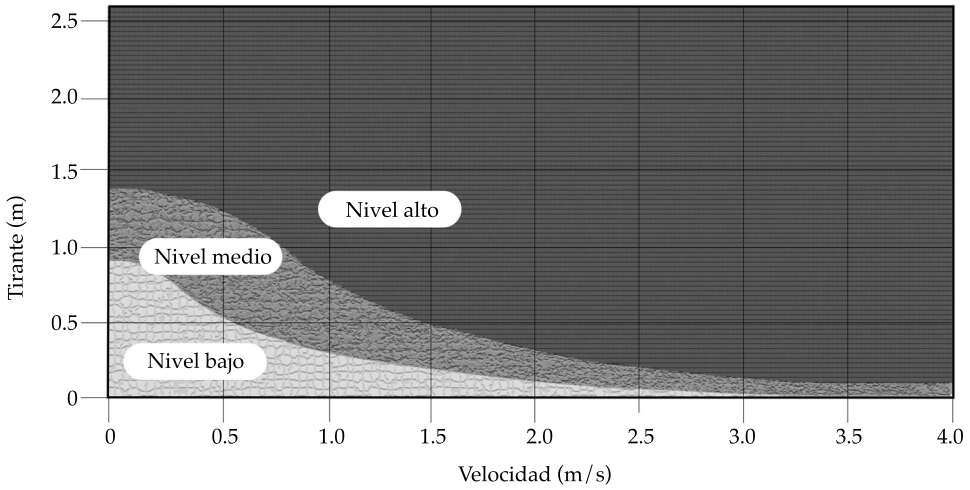


Figura 2. Niveles de peligro que relacionan tirante del agua (m) y velocidad (m/s). Adaptada de FEMA (2009).

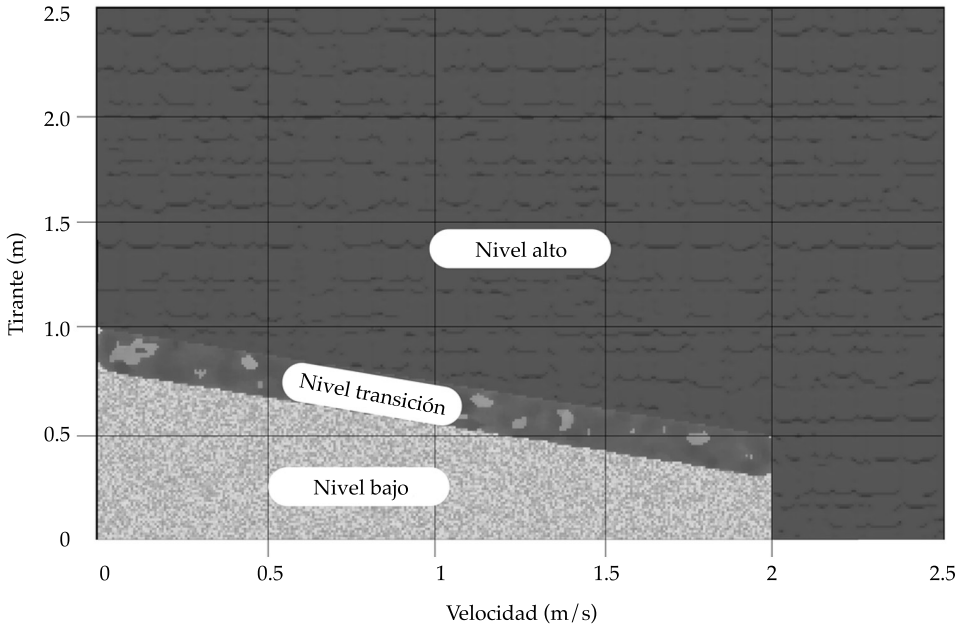


Figura 3. Niveles de peligro aplicados en la ciudad de Dórrigo, Australia (NSW, 2005).

d) Criterio propuesto por el IMTA (2015)

Los mapas de peligro propuestos por el IMTA están fundados en investigaciones de Alcocer-Yamanaka *et al*. (2012), que definen como base para el manejo del agua de las aguas pluviales cuatro componentes (ver figura 4): el primero corresponde a la identificación de la problemática de las inundaciones, que puede derivarse de diversos factores; el segundo, a los análisis hidrológicos e hidrográficos en el que se identifican las lluvias que ocasionan inundaciones y la generación de lluvias de diseño, así como la identificación de los usos de suelo, cuencas

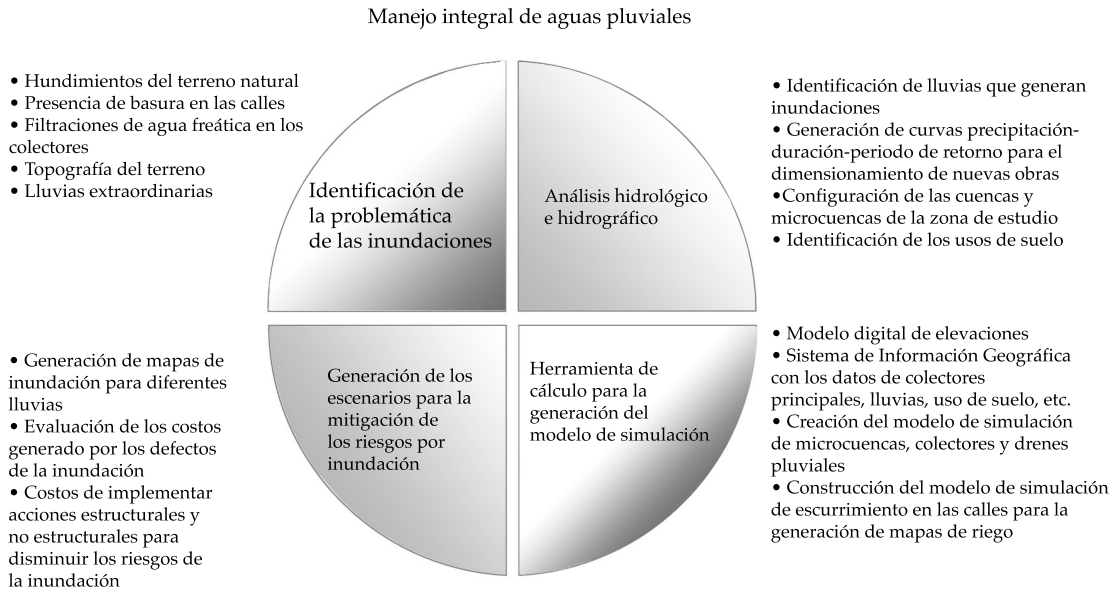


Figura 4. Componentes de un programa para el manejo integral de las aguas pluviales (Alcocer-Yamanaka *et al.*, 2012).

y microcuencas. El tercero, a la utilización de diversas herramientas de cálculo, que permiten la construcción del modelo de simulación de microcuencas, colectores y drenes pluviales, y la construcción del modelo de escurrimiento en calles. Por último, el cuarto, a la generación de diversos escenarios con los cuales se evaluará el impacto del fenómeno hidrometeorológico.

Generalizando lo descrito por Yamanaka *et al*. (2012), los mapas de peligro se obtienen a través de tres aspectos principales, que brindarán la información elemental para la construcción del modelo numérico de escurrimientos superficiales. El primero se basa en analizar la precipitación, con el fin de establecer el comportamiento espacial y temporal de la lluvia (lluvia de proyecto). El segundo toma en cuenta la infraestructura urbana de la región de estudio (configuración del terreno). Por último, el tercer aspecto se refiere a la delimitación de subcuencas y microcuencas de estudios, considerando los parámetros geomorfológicos (área, perímetro, ancho, longitud del cauce principal, etc.) (figura 5).

Para fines de aplicación de la metodología, se obtienen las lluvias de proyecto, que corresponden a 2, 5, 10, 20, 50, 100 y 200 años de periodo de retorno. En cuanto a la configuración del terreno, se determina con la planimetría de la ciudad, el levantamiento topográfico de la misma (como ejemplo, se puede utilizar la topografía

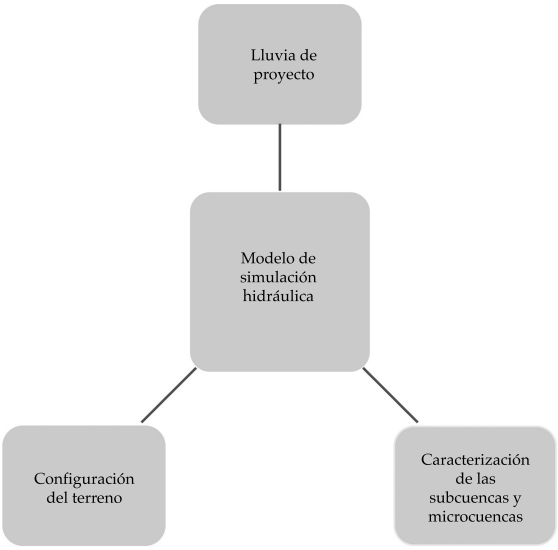


Figura 5. Variables esenciales para la simulación hidráulica en dos dimensiones.

LIDAR) y los usos de suelo. Con esta información es posible caracterizar y determinar la configuración de las subcuencas y microcuencas de toda la zona urbana analizada, y se construye el modelo de simulación hidráulico. Con base en las lluvias de proyecto se determinan para cada periodo de retorno los tirantes y velocidades a nivel calle. En el análisis es posible considerar la infraestructura pluvial urbana existente, así como arroyos y ríos.

El mapa de peligro se genera para cada periodo de retorno, considerando los tirantes y velocidades calculados con el modelo numérico. Para determinar los mapas de peligro se tomaron en cuenta, además de las variables de tirante y velocidad, volcamiento y deslizamiento, mostrados en el cuadro 1.

Justificación empírica del criterio establecido para la generación del mapa de peligro por inundación propuesto en el cuadro 1

Los valores de las variables propuestas en el cuadro 1 se establecen con los criterios siguientes: el tirante de 0.3 m se considera con un nivel de peligro nulo debido a que éste no alcanza a rebasar el nivel de banqueta promedio, por lo que el agua no llegaría a entrar en los hogares. En los rangos de 0.3 a 0.5 metros, el nivel de peligro se considera bajo, es decir, el daño a la estructura de la casa, así como al menaje, no es considerable. En tirantes de 0.5 a 1.5 metros, el nivel de peligro es medio, debido a que el daño a muebles y estructura del hogar tiende a ser elevado. Cuando el nivel del agua alcanza 1.5 metros de altura, el peligro se cataloga como alto.

En cuanto al deslizamiento, Nanía (1999) realizó un modelo teórico experimental para la ciudad de Mendoza, Argentina, donde el estudio abarca 30 manzanas, conformado por 50 tramos de calles y 21 cruces. Analizó el riesgo asociado con el escurrimiento pluvial en calles. El estudio tomó en cuenta la estabilidad al deslizamiento de las personas ante la fuerza de arrastre que ejerce el flujo sobre ellas cuando es necesario cruzar la calle. Obtuvo como resultado el valor de 1.23 m^3/s^2 como límite para que una persona cruce sin problemas. Para determinar este valor, se tomó en cuenta velocidad y tirante del flujo en conjunto. La estabilidad al deslizamiento de un sujeto ante la fuerza de arrastre se calcula con la ecuación (1):

$$F = \frac{1}{2} C_d \rho A V^2 \qquad (1)$$

donde:

F = fuerza de arrastre del agua (N).
C_d = coeficiente de arrastre, que depende básicamente de la forma de la superficie contra la cual choca el fluido (adimensional).
ρ = densidad del fluido (kg/m^3).
A = proyección frontal del área en donde actúa la fuerza del agua, que es igual a $y(b)$, siendo éste el producto del tirante por el ancho de la persona, en este caso de las piernas (m^2).
V = velocidad del fluido (m/s).

Suponiendo que la persona en cuestión pueda ser capaz de mantenerse en pie, la fuerza que debe equilibrarla es la de fricción del calzado sobre el suelo y sería igual a la ecuación (2):

Cuadro 1. Criterios establecidos para la generación del mapa de peligro por inundación (IMTA, 2015).

Nivel de peligro	Altura (m)	Volcamiento (m^2/s)	Deslizamiento (m^3/s^2)
Nulo	$h < 0.3$	$vh < 0.3$	$v^2h < 0.3$
Bajo	$0.3 \geq h < 0.5$	$0.3 \geq vh < 0.5$	$0.3 \geq v^2h < 0.5$
Medio	$0.5 \geq h < 1.5$	$0.5 \geq vh < 1.5$	$0.5 \geq v^2h < 1.23$
Alto	$h \geq 1.5$	$vh \geq 1.5$	$v^2h \geq 1.23$

• ISSN 2007-2422

$$F_{cs} = \mu W_p \quad (2)$$

donde:

F_{cs} = fuerza de fricción del calzado sobre el suelo (kgf).
μ = coeficiente de fricción, que depende de los materiales del calzado y suelo, y del estado de ambos (adimensional).
W_p = peso de la persona (kgf).

Considerando que el coeficiente de arrastre para un cilindro de altura infinita es igual a 1.2 (Streeter & Wylie, 1979), la densidad del agua es de 1 000 kg/m^3, el ancho de las piernas b = 0.1 m × 2 = 0.2 m; el peso de la persona de 60 kgf, y el coeficiente de fricción entre el caucho y el concreto húmedo igual a 0.50 (Gieck, 1981), con un coeficiente de seguridad de 2, para incluir el efecto del empuje y la posible variación de los parámetros considerados, la condición de estabilidad está dada por la siguiente desigualdad:

$$v^2 h = \frac{2\mu P1}{C_d \rho B2} = \frac{2(0.5)(60)(9.81)}{1.2(2)(1\,000)(0.2)} \frac{m^3}{s^2} = 1.23 \frac{m^3}{s^2}$$

El límite de 0.30 cm de tirante de inundaciones está adaptado para que el escurrimiento superficial no pueda entrar a los edificios; además, Témez (1992) menciona en su estudio que la velocidad máxima permisible es de 1 m/s para determinar el volcamiento de objetos.

Mapa de vulnerabilidad por inundación

La vulnerabilidad es la medida de la susceptibilidad de un bien expuesto a la ocurrencia de un fenómeno perturbador (Cenapred, 2004). De dos bienes expuestos, uno es más vulnerable si, ante la ocurrencia de fenómenos perturbadores con la misma intensidad de la lluvia, éste sufre mayores daños. A diferencia del peligro, que está definido por los patrones climáticos (la naturaleza) y debido a ello es difícil modificarlo, la vulnerabilidad es una variable que el hombre tiene la posibilidad de disminuir.

El cálculo de la vulnerabilidad está limitado a los daños directos que puedan sufrir las residencias o daños inmobiliarios como las casas; en cambio, no se consideran daños indirectos, como pueden ser los psicológicos, provocados en personas afectadas por un evento de lluvia, u otros muy específicos, como en comercios o industrias, debido a que esta vulnerabilidad es muy compleja, específica o no cuantificable; también hay aspectos diversos, como pueden ser la pérdida de vidas humanas o daños al medio ambiente.

La vulnerabilidad se denomina daño potencial, y se define como la característica de una persona o grupo en relación con su capacidad de prever, combatir, resistir y recuperarse del impacto de un suceso natural. Es por esto que la vulnerabilidad presenta un comportamiento desigual según grupos sociales, actividades productivas o territorios (Ribera, 2004).

Mapas de vulnerabilidad propuesto por IMTA (2015)

Para la elaboración de los mapas se toman como punto de partida los avances en la construcción de mapas de vulnerabilidad desarrollados por el Cenapred (2007). El procedimiento propuesto es el siguiente: recopilación de información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), seleccionándose las Áreas Geoestadística Base (AGEB), que son bases de datos con información georreferenciada por manzanas en cuanto a nivel socioeconómico de la población, población económicamente activa, total de viviendas y tipo de viviendas, entre otras 190 variables.

De acuerdo con la clasificación de vulnerabilidad de Cenapred (2006), ésta se hace en campo y se verifica casa por casa, lo que resulta en un trabajo oneroso; así como los tiempos de ejecución, que pueden ser semanas, en función de la extensión de la zona en estudio. En la propuesta metodológica de este artículo, la vulnerabilidad de las casas se calcula en nivel de manzana, pues así está la información contenida en los AGEB del INEGI.

En la información contenida en los AGEB se puede consultar el número de viviendas

ISSN 2007-2422

particulares habitadas con un solo cuarto; viviendas particulares habitadas con dos cuartos; viviendas particulares habitadas con tres cuartos y más, además de la población económicamente activa. Con esta información se determinan los tipos de vivienda.

Para determinar en qué tipo de vulnerabilidad se ubican las casas en nivel manzana se usa el siguiente indicador:

$$\text{Tipo I} = \frac{\text{Viviendas de un solo cuarto}}{\text{Viviendas totales en la manzana}} \quad (1)$$

$$\text{Tipo II} = \frac{\text{Viviendas con dos cuartos}}{\text{Viviendas totales en la manzana}} \quad (2)$$

$$\text{Tipo III} = \frac{\text{Viviendas con tres cuartos o más}}{\text{Viviendas totales en la manzana}} \text{ y que la PEA} < 0.4 \quad (3)$$

$$\text{Tipo IV} = \frac{\text{Viviendas con tres cuartos o más}}{\text{Viviendas totales en la manzana}} \text{ y que la PEA} > 0.4 \quad (4)$$

En el cuadro 2 se establecen cuatro rangos de clasificación, donde se considera un costo de menaje de las viviendas, que va desde $12 500.00 hasta $300 000.00.

Mapa de riesgo por inundaciones

De acuerdo con Cenapred (2004), riesgo es la combinación de tres factores: valor de los bienes expuestos (*C*), vulnerabilidad (V) y probabilidad (P) de que se exceda la variable aleatoria que caracteriza un hecho potencialmente dañino. De manera simbólica:

$$\text{Riesgo} = C\ P\ V \quad (5)$$

La estimación del riesgo puede hacerse a nivel de vivienda, para que al sumarse con el de otras viviendas se tenga una idea del riesgo en una localidad, que a su vez, si se acumula para un municipio, proporcionaría una estimación del riesgo de ese municipio, y así de manera sucesiva. De esta forma se pueden crear mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo de acuerdo con los alcances ya expuestos.

Para decir que existe un riesgo por inundación en cualquier municipio de la república mexicana es necesario cumplir con la existencia de una probabilidad alta de que ocurran precipitaciones mayores a las de su correspondiente umbral de lluvia en las siguientes 24 horas, y haya una clasificación con vulnerabilidad alta o media, por lo que se podrían esperar efectos adversos en la comunidad o sus bienes.

Método propuesto por Ribera (2004)

Los mapas de riesgo o mapas de daños potenciales por inundación se pueden definir también como una situación susceptible de causar un daño, como consecuencia de un evento de lluvia que se presenta en un medio vulnerable, como el área de alguna colonia o zona de una ciudad. Así, el riesgo se puede formular como el producto del área afectada, por la peligrosidad del evento, y número de elementos (casas, personas, etc.) que está en juego, y su vulnerabilidad (Ribera, 2004).

$$\text{Riesgo} = \text{Área de afectación* peligrosidad del suceso * número de elementos en juego * vulnerabilidad de los elementos en juego} \quad (8)$$

Para llevar a cabo mapas de riesgo se debe disponer de cuatro mapas:

- Áreas inundables.
- Peligro.
- Exposición.
- Vulnerabilidad.

Los dos primeros sirven para localizar y caracterizar el suceso, y dan lugar al mapa final de peligrosidad. El tercero y cuarto mapa sirven para localizar y caracterizar los elementos en

• ISSN 2007-2422

Cuadro 2. Vulnerabilidad por tipo de vivienda obtenida del análisis de información contenida en el AGEB. Fuente: IMTA, 2015.

Construcción de viviendas en la manzana	Clasificación de vulnerabilidad de viviendas (Cenapred, 2007)	Clasificación de la vulnerabilidad, considerando la información contenida en el AGEB del INEGI	Vulnerabilidad	Costo del menaje
Tipo I	Este tipo de vivienda corresponde a los hogares más humildes. Por lo general consta de un solo cuarto multifuncional, construido con material de desecho. El menaje es el mínimo indispensable	Para este rubro se consideró como indicador la relación entre el número de viviendas particulares habitadas con un solo cuarto entre el total de viviendas localizadas en la manzana	Alta	$12 500.00
Tipo II	Corresponde a hogares que pueden ser calificados como de clase baja, donde la vivienda se describiría como de autoconstrucción o construida con material de la zona, la mayoría de las veces sin elementos estructurales. Las habitaciones cuentan con muebles propios El tercer tipo de vivienda también lo califica como clase baja, similar al tipo II, pero con techos más resistentes, construida la mayoría de las veces sin elementos estructurales. El menaje corresponde al necesario para las diferentes habitaciones	Para este tipo se consideró la relación de viviendas particulares habitadas con dos cuartos entre el total de viviendas	Media	$50 000.00
Tipo III	Se identifica como típica de la clase media. Puede ser equiparada con una vivienda de interés social, construida la mayoría de las veces con elementos estructurales. El menaje corresponde al de una casa típica de una familia de profesionales que ejerce una carrera y vive sin complicaciones económicas	En este caso se considera la relación entre viviendas particulares habitadas con tres cuartos o más entre el total de viviendas. Si el valor es mayor que 0.5, se evalúa entonces la relación entre la población económicamente activa entre la población total, que debe ser menor a 0.4. Se deberán descartar las manzanas que caen en los tipos I y II	Baja	Menaje para casa de dos pisos: $150 500.00 Para el daño en menaje se considera la mitad de este costo, pues las casas se consideran de dos pisos
Tipo IV	Corresponde al tipo residencial, construida con acabados y elementos decorativos, que incrementan de forma sustancial su valor. El menaje está constituido por artículos de buena calidad y con muchos elementos de comodidad. La familia la integran profesionales que ejercen una carrera y viven sin complicaciones económicas	Se considera la relación entre viviendas particulares habitadas con tres cuartos o más entre el total de viviendas. Si el valor es mayor que 0.5, se evalúa entonces la relación entre la población económicamente activa entre la población total, que debe ser mayor de 0.4. Se deberán descartar las manzanas que están en los tipos anteriores	Muy baja	Menaje para casa de dos pisos: $300 000.00 Para el daño se considera la mitad de este costo, pues las casas se consideran de dos pisos

ISSN 2007-2422

juego, que a la postre conducen al mapa final de vulnerabilidad.

Generación de mapas de riesgo propuesto por IMTA (2015)

Los mapas de riesgo se generan a partir de una adaptación de la propuesta realizada por Ribera (2004). Primero se determinan los mapas de peligro a partir de un criterio definido de peligro y con base en el análisis hidráulico hecho con el modelo en dos dimensiones se calculan los tirantes y velocidades a lo largo de la ciudad; esto, para las lluvias con diferentes periodos de retorno.

Asimismo, se obtienen los mapas de vulnerabilidad de acuerdo con un criterio definido de vulnerabilidad, que puede calcularse con base en el tipo de vivienda, edad de las personas, zonas escolares, áreas industriales, etcétera.

La combinación de mapas de peligro y vulnerabilidad, a partir de un criterio de riesgo, permite calcular los mapas de riesgo, de los cuales se obtienen los costos por daños generados por la inundación para diferentes periodos de retorno (ver figura 6).

Aplicación de la metodología propuesta. Caso de estudio: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Descripción de la zona de estudio

El municipio de Tuxtla Gutiérrez es uno de los 2 457 municipios que conforman la república mexicana. Cuenta con una extensión territorial de 412.40 km^2. Se encuentra entre las coordenadas 16° 38′ y 16° 51′ de latitud norte, 93° 02′ y 94° 15′ de longitud oeste, y tiene una altitud promedio de 552 msnm (ver figura 7). Para el año 2010, la ciudad de Tuxtla Gutiérrez contaba con 537 102 habitantes, que representan 11% del total de la población del estado (INEGI, 2010).

El sistema terrestre de la zona donde se encuentra el municipio está caracterizado por

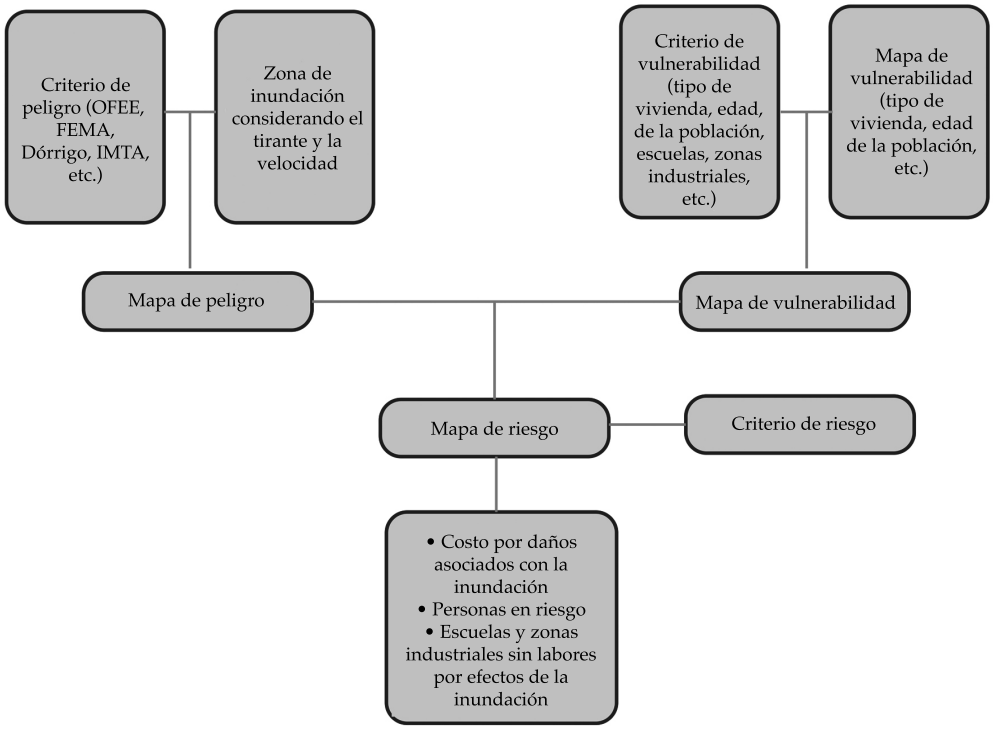


Figura 6. Metodología para definir los mapas de riesgo.

• ISSN 2007-2422

Figura 7. Localización de la zona de estudio.

valles, terrazas, montañas y pies de monte. Destaca además el paso del río Sabinal. A medida que se incrementó la población, se llevaron a cabo edificaciones sin un plan de ordenamiento territorial adecuado, cambiado el uso de suelo y estableciendo infraestructura urbana donde se tiene una mayor riesgo ante un evento hidrometeorológico extremo, por lo que se producen inundaciones y encharcamientos.

Estas acciones antropogénicas sobre la cuenca han provocado un aumento del volumen de escurrimiento, acrecentándose las magnitudes de los gastos pico de las avenidas y una reducción de los tiempos en que se presenta dicho gasto, originándose inundaciones severas y recurrentes; pérdida de suelos que incrementan el volumen de azolves; aumento del riesgo de deslaves dentro de la cuenca del río Sabinal (Instituto Estatal del Agua, s.f.); decremento de la vida útil de la infraestructura pluvial urbana existente; aumento de residuos sólidos; contaminación de las fuentes de agua; afectaciones a los bosques, etc. Todo esto ha puesto en riesgo la vida y bienes de los habitantes de zonas vulnerables.

Afectaciones causadas por inundaciones

Históricamente, la población y ciudad de Tuxtla Gutiérrez se han visto afectadas por inundaciones debidas al río Sabinal, que cruza en longitud de 6.5 km, que contiene tributarios (arroyos) que aumentan el problema. De acuerdo con el Instituto de Protección Civil (2015), se tienen documentados los daños causados por inundaciones desde 1920 hasta la fecha.

Conociendo la necesidad de contar con un estudio fehaciente que permita establecer las zonas de riesgo por inundación, se aplica la metodología propuesta a este trabajo para la generación de mapas de riesgo por inundaciones.

Construcción de mapas de riesgo por inundación

Para la generación de mapas de riesgo, en un primer término se generaron los mapas de peligro y vulnerabilidad. Al tener en conjunto estos mapas, el proceso para la construcción de los mapas de riesgo se lleva a cabo mediante

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 33-55
ISSN 2007-2422

un análisis matricial, como se muestra a continuación.

Mapas de peligro por inundación

Se realizaron simulaciones hidráulicas, considerando lo planteado en la figura 4. Los mapas se calcularon y construyeron a partir del criterio presentado en el cuadro 1.

En la figura 8 se muestra el mapa de peligro generado para un periodo de retorno de 20 años. En tono claro se marcan las zonas de peligro bajo; en color medio, las zonas de peligro medio; y en tono oscuro, las zonas de peligro alto. La precipitación indicada corresponde a la precipitación máxima para una duración de 60 minutos.

Mapa de vulnerabilidad por inundación

El mapa de vulnerabilidad de las construcciones se calculó con base en el cuadro 2. En la figura 9 se presenta el mapa de vulnerabilidad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

Mapas de riesgo por inundación

El riesgo está implícito en nuestras vidas y es parte inseparable de las acciones, entendiéndose que es la proximidad a un daño, donde existe la posibilidad de tener pérdidas significativas o resultados adversos. Para su representación se utiliza una base cartográfica, en la cual mediante parámetros establecidos se localiza la manera en que impactan los sistemas afectables.

El criterio de riesgo se define a partir de lo descrito por el IMTA (2015), establecidos cuatro rangos, que se describen a continuación:

1. Riesgo nulo, este se define para las zonas en que el peligro resulta nulo o para la vulnerabilidad muy baja y peligro bajo.

2. Riesgo bajo. Son aquellas zonas de la ciudad en que se presenta un peligro bajo y vulnerabilidad baja o media, o un peligro medio y una vulnerabilidad muy baja. Para este tipo de riesgo se considera que la pérdida del menaje de la casa será de 10%.

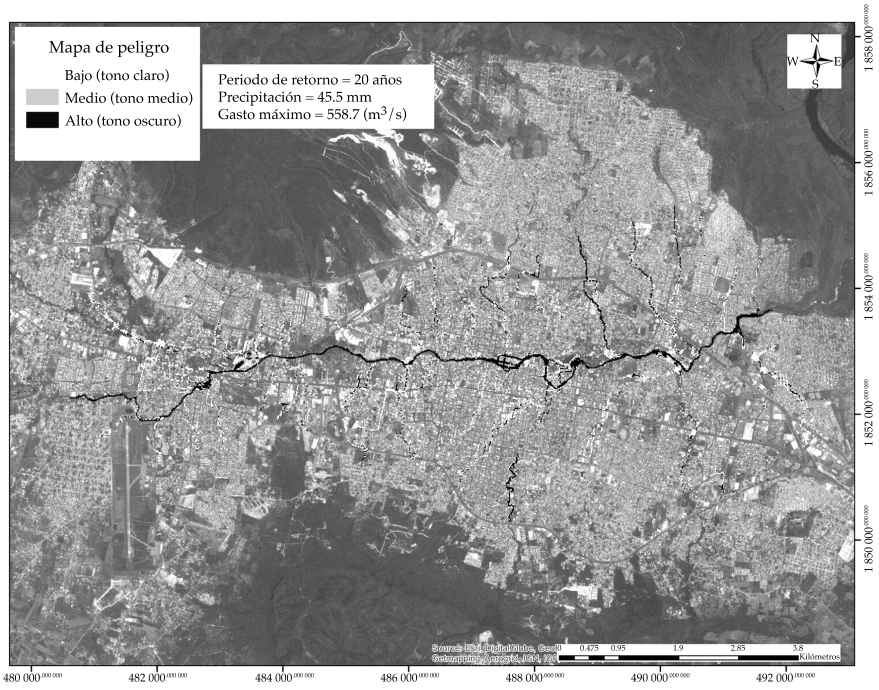


Figura 8. Mapa de peligro para un periodo de retorno de 20 años.

• ISSN 2007-2422

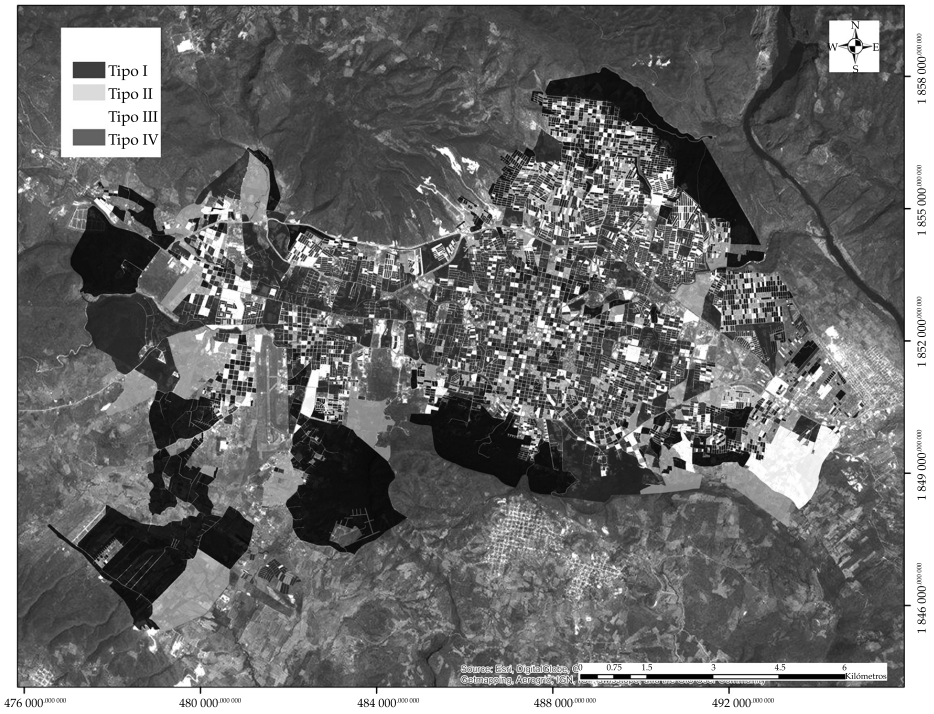


Figura 9. Mapa de vulnerabilidad por tipo de vivienda, en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

3. Riesgo medio. Se considera cuando el peligro es bajo y la vulnerabilidad alta; el peligro medio y las vulnerabilidades bajas o medias; el peligro alto y la vulnerabilidad muy baja. La pérdida del costo del menaje es de 50%.

4. Riesgo alto. Para cuando el peligro es medio y la vulnerabilidad alta, o el peligro alto y la vulnerabilidad es de baja a alta. La pérdida del menaje de casa resulta de 100%.

En la figura 8 se presenta uno los mapas de riesgo por inundación generado a partir del modelo de simulación 1D-2D y de acuerdo con el criterio planteado en el cuadro 3. Como se puede observar, el mapa de riesgo con la simulación para un periodo de retorno de 20 años comienza a señalar las márgenes de los arroyos con peligro bajo a medio, y en las zonas urbanas se presenta en algunas zonas un peligro alto-medio; esto concuerda con los recorridos de campo en los arroyos, donde se observó la invasión de construcciones en prácticamente todos los cauces.

Con los mapas antes descritos, es posible establecer un plan de contingencia ante inundaciones que se presenta a continuación.

Plan de contingencia ante inundaciones

Un resultado importante en la generación de mapas de peligro y riesgo es la generación de planes de contingencia, como rutas de evacuación seguras de personas hacia refugios ubicados en la zona urbana en estudio. Tales planes deben estar apoyados y generados con ayuda de mapas de peligro y riesgo por inundación, pues permiten identificar visualmente las zonas problemáticas de la ciudad, en donde los efectos de los escurrimientos pueden generar algún daño.

En la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, se cuenta con 17 zonas de refugio distribuidas en toda el área del municipio, con el objetivo

ISSN 2007-2422

Cuadro 3. Criterio de riesgo en función del peligro y vulnerabilidad, y porcentaje de daño causado al menaje de la casa.

Vulnerabilidad por tipo de vivienda	Peligro			
	Nulo	Bajo	Medio	Alto
Muy baja (Tipo IV)	Riesgo nulo RN (0%)	RN (0%)	Riesgo bajo RB (10%)	Riesgo medio RM (50%)
Baja (Tipo III)	RN (0%)	RB (10%)	RM (50%)	Riesgo alto RA (100%)
Media (Tipo II)	RN (0%)	RB (10%)	RM (50%)	RA (100%)
Alta (Tipo I)	RN (0%)	RM (50%)	RA (100%)	RA (100%)

de proveer un lugar seguro a la población en caso de presentarse un desastre natural, como un evento de lluvia extrema, que producirá inundaciones en ciertas zonas urbanas. En la figura 10 se presenta la distribución de dichas zonas de refugio.

Para el establecimiento de la ruta de evacuación se toman en cuenta los refugios establecidos por Protección Civil del municipio. En el análisis de las rutas de evacuación se considera el número máximo de personas que es capaz de albergar en caso de un siniestro contra los habitantes circunvecinos a dicho albergue. Después se evaluó la ruta óptima de evacuación, considerando los mapas de peligro por inundación y el desalojo de los habitantes más vulnerables (personas de la tercera edad y niños) que serían llevadas al refugio.

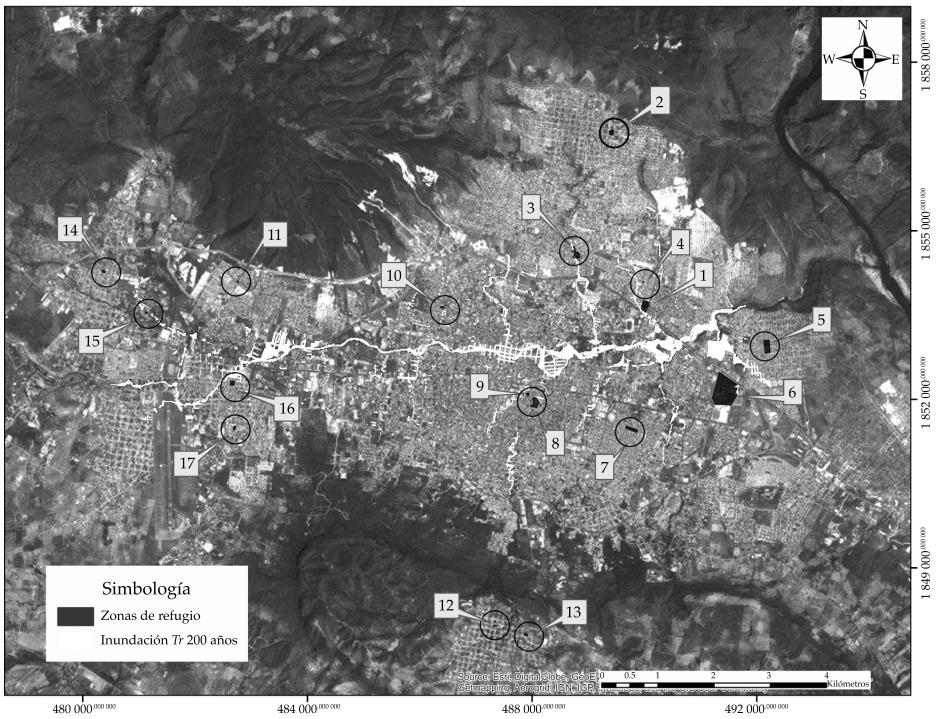


Figura 10. Zonas de refugio en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

• ISSN 2007-2422

A fin de decidir la ruta de evacuación de las personas hacia el refugio seleccionado, denominado Parroquia Santa Cruz, se determinó la vulnerabilidad de las viviendas mostradas en la figura 9, cuya zona de inundación presenta un peligro alto de acuerdo con su mapa de peligro por inundaciones. La ruta de evacuación considera ciertas restricciones de desplazamiento, como puentes que deben atravesar los peatones. Se indican aquellos que son seguros pasar a pie o los que presentan un problema. En este caso se señalan con un símbolo de rectángulos en tono oscuro los que no son viables para el cruce debido a que la inundación rebasa tal infraestructura. Asimismo, se muestran las calles con problemas de encharcamiento o inundación no viable para los peatones (las líneas en color oscuro señalan las calles por las que no se debe cruzar). De esta forma se obtiene la ruta de evacuación idónea, mostrada en la figura 11, marcada en color negro (ruta 7).

Además, se configura el nombre de las calles de la ciudad en cuestión con sus distancias entre calles, con el fin de poder conocer las indicaciones para llegar al refugio (ver cuadro 4), donde se especifica que la distancia a recorrer es de 1.3 km y el tiempo promedio de recorrido se establece con el factor de que una persona puede caminar 4 km por hora. Por lo tanto, el tiempo de traslado se estima en 16 minutos.

Resultados

Evaluación del riesgo por inundación (daños a menaje de casa y población)

De acuerdo con el cuadro 5, se muestran los daños generados por los efectos de la inundación, expresado en costo, para diferentes periodos de retorno. Para una lluvia con periodo de retorno de dos años, el daño estimado en costo a menaje de casa se eleva a $130.18 millones de pesos; para una lluvia con periodo de retorno de cinco años, los costos estimado por daño se calculan en $180.73 millones de pesos, es decir, 1.8 veces más que los daños generados por la lluvia de periodo de

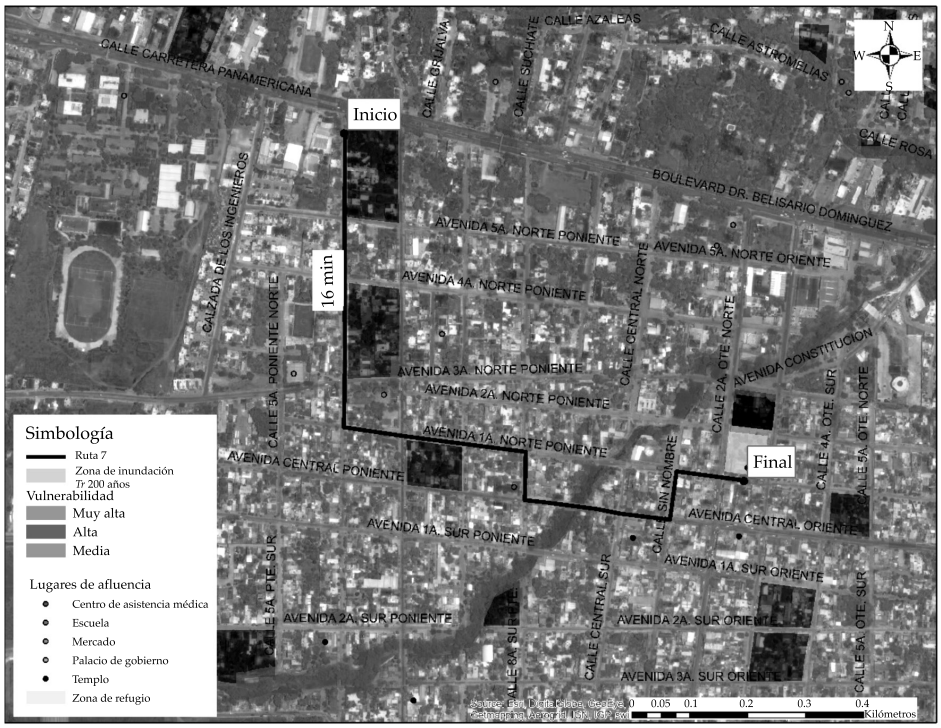


Figura 11. Ruta generada considerando vulnerabilidad de las viviendas y peligro por inundación.

ISSN 2007-2422

Cuadro 4. Indicaciones de la ruta de la figura 11.

Ruta hacia un destino específico				
Núm.	**Distancia acumulada (m)**	**Indicaciones**	**Distancia en el tramo (m)**	**Tiempo en el tramo (min)**
1	0.0	Comience en el punto de inicio		
2	0.0	Vaya hacia el sur en la calle 4A. Poniente Norte hacia la cerrada Los Compadres	483.1	6
3	483.1	Gire a la izquierda en Avenida 1A. Poniente Norte	303.9	4
4	787.0	Gire a la derecha en la calle 1A. Poniente Norte	79.6	< 1
5	866.6	Gire a la izquierda en Avenida Central Oriente	160.8	2
6	1 027.3	Continúe en Avenida Central Oriente	81.7	< 1
7	1 109.1	Gire a la izquierda en la calle sin nombre	80.2	< 1
8	1 189.3	Gire a la derecha para continuar en la calle sin nombre	112.8	1
9	1 302.1	Finalice en el punto final, en la derecha		
		Tiempo total de recorrido	16	min
		Distancia total:	1 302.1	m

Cuadro 5. Costos estimados por daños al menaje de casa generado por inundaciones para diferentes periodos de retorno.

Tr	**Daños por efectos de la inundación**		**Precipitación**		**Gasto**	
	Costo ($)	**Incremento a los daños con respecto al periodo de retorno de dos años**	**(mm)**	**Incremento de la precipitación con respecto al periodo de retorno de dos años**	**(m^3/s)**	**Incremento al gasto con respecto al periodo de retorno de dos años**
2	103 186 717	1.0	15.2	1.00	130.5	1.0
5	180 738 281	1.8	26.3	1.73	283.7	2.2
10	240 290 948	2.3	35.7	2.35	406.7	3.1
20	320 759 221	3.1	45.5	2.99	558.7	4.3
50	420 260 048	4.1	59.0	3.88	929.5	7.1
100	498 560 851	4.8	69.2	4.55	1 052.0	8.1
200	522 752 625	5.1	79.6	5.24	1 318.5	10.1
500	642 767 432	6.2	93.3	6.14	1 705.0	13.1
1 000	697 009 619	6.8	103.7	6.82	2 026.0	15.5

retorno de dos años. Para la lluvia con periodo de retorno de diez años, el costo estimado de daños a menaje de casa asciende a $240.29 millones de pesos, que resulta 2.3 veces el daño correspondiente a un periodo de retorno de dos años.

En el Instituto de Protección Civil (2004) se realizó, con recursos del Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (Fopreden) y del gobierno del estado de Chiapas, un estudio de análisis de alternativas para solucionar el problema de inundaciones, a raíz de las lluvias en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. En el informe correspondiente se detallan los costos por daños provocados por las inundaciones para diferentes periodos de retorno. En el cuadro 6 se presenta una comparación de los costos por daños generados por las inundaciones para diferentes periodos de retorno estimados por el Instituto de Protección Civil con respecto a los costos estimados con el modelo 1D-2D.

• ISSN 2007-2422

Cuadro 6. Comparación de costos por daños generados por las inundaciones de acuerdo con el análisis hecho por el Instituto de Protección Civil y el modelo de simulación 1D-2D.

Periodo de retorno *Tr* en años	Costos por daños calculados por el Instituto de Protección Civil ($en millones de pesos)	Costos por daños calculados con el modelo 1D-2D ($millones de pesos)	Gasto en (m^3/s) considerado en el análisis de daños por el Instituto de Protección Civil	Gasto (m^3/s) calculado con el modelo 1D- 2D
2	-	$103.19	-	130.5
5	187.40	$180.74	234	283.7
10	316.10	$240.29	358	406.7
20	405.30	$320.76	494	558.7
50	477.80	$420.26	689	929.5
100	524.10	$498.56	846	1 052.0
200	-	$522.75	-	1 318.5
500	625.20	$642.77	1 243	1 705.0
1 000	668.30	$697.01	1 423	2 026.0

Evaluación del riesgo por inundación (daños a la infraestructura de la vivienda)

Para la evaluación del daño, se considera el daño estructural que puede generarse en una casa de acuerdo con el análisis efectuado por el IMTA (2015), donde se especifica que a partir de una altura de 1.599 m de agua se pueden presentar daños por el efecto del cortante (vuelco) en las paredes de la vivienda (ver figura 12).

Figura 12. Falla en muro de mampostería en Cambridge, Reino Unido, diciembre de 2001. Fuente: Kelman (2002).

Esto reflejaría un costo por reparaciones, por lo que de acuerdo con Velez, Fuentes, Rubio y De Luna (2014), genera una curva de daño a la infraestructura con respecto al tirante, donde toma un valor de $85 000 pesos. El cuadro 7 contiene los valores por el daño estructural, dependiendo del tipo de vivienda y vulnerabilidad.

Sobreponiendo el mapa de peligro con lluvia vinculada con un periodo de retorno que va desde los 10 hasta los 1 000 años, se puede establecer el costo total probable que puede generarse por daño estructural (ver cuadro 8 y figura 13).

Reubicación de las zonas de refugio

A consecuencia de estas afectaciones presentadas, se propone la reubicación de los refugios que corren peligro por inundación, a fin de evitar cualquier problema a consecuencia de la ubicación desfavorable en la que se encuentren. Se consideró que los sitios propuestos estuvieran en zonas cercanas a los anteriores, para que tenga la misma cantidad de personas a refugiarse. La figura 14 muestra la ubicación geoespacial de la reubicación de los refugios.

Es fundamental conocer la categoría de la estructura y su dirección, para que su localización sea fácil y eficiente. En el cuadro 9 se presentan los datos básicos de cada refugio.

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 33-55
ISSN 2007-2422

Cuadro 7. Costo del daño estructural por tipo de vivienda.

Vulnerabilidad	Tipo de vivienda	Costo por daño estructural ($)
Muy Alta	I	85 000
Alta	II	77 000
Media	III	69 000
Baja	IV	61 000
Muy Baja	V	53 000

Cuadro 8. Esperanza por daño estructural para los diferentes escenarios analizados.

Periodo de retorno (años)	Costo por daño estructural ($ pesos)
1 000	119 384 730.00
500	92 353 700.00
200	72 497 465.00
100	66 737 420.00
50	60 775 110.00
20	53 353 900.00
10	39 344 400.00
5	35 343 520.00
2	24 886 410.00

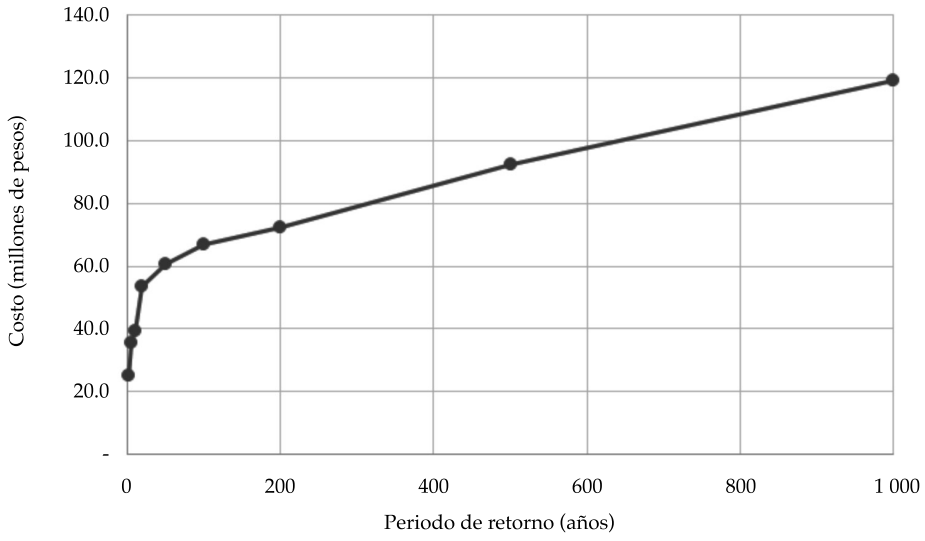


Figura 13. Curva daños estructurales-periodo de retorno.

Discusión

Análisis para la construcción de mapas de peligro por inundación

A partir de los resultados de los diferentes escenarios de lluvia realizados con el modelo de simulación hidráulica bidimensional del caso de estudio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, se hizo una comparación entre los diferentes criterios de peligro encontrados en la literatura y el propuesto en este artículo. Se compara el área de inundación que calcula cada criterio para los diferentes escenarios.

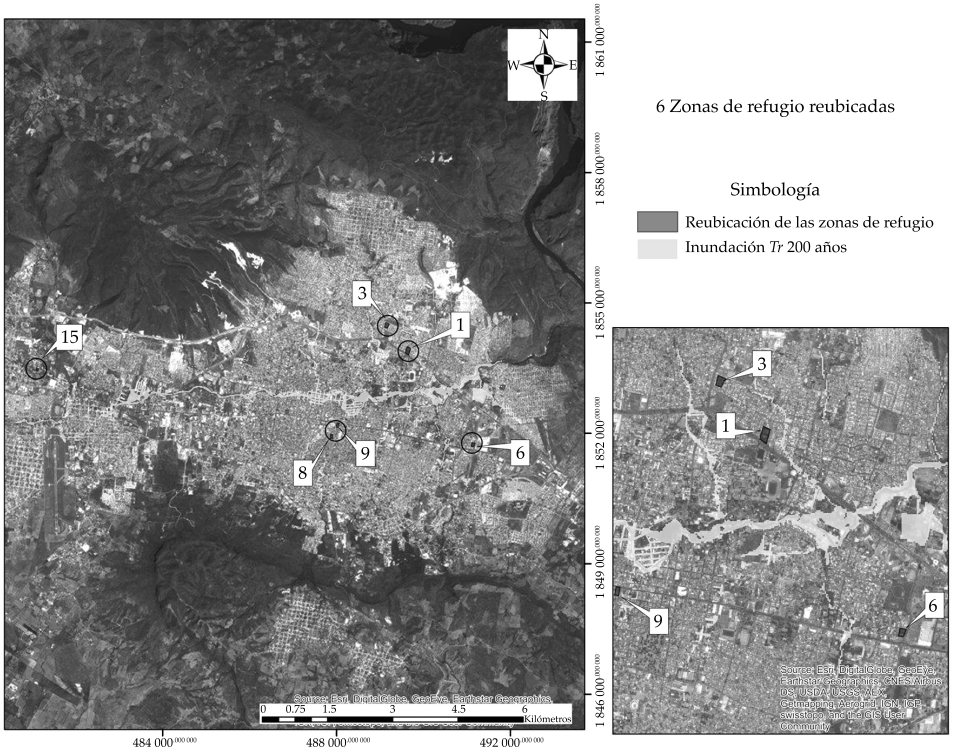


Figura 14. Reubicación de las zonas afectadas.

Cuadro 9. Zonas de refugio reubicadas.

Zonas de refugio reubicadas, en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas				
Núm.	**Categoría**	**Dirección**	**Hab.**	**Área (m²)**
1	Escuela Primaria Federal Cuauhtémoc	Libramiento Norte Oriente y calle Río Lacantum	100	11 904.01
3	Escuela primaria Juan Sabines Gutiérrez	Avenida Cardenia y calle Geranio	50	7 693.48
6	Escuela	Calzada Andrés Serra Rojas y calle Costa Rica	100	4 755.19
8	Escuela	Avenida 3A. Sur Oriente y calle 4A. Oriente Sur	200	3 979.80
9	Escuela	Avenida 1A. Sur Oriente y calle 4A. Oriente Sur	800	3 808.51
15	Templo	Avenida Chiapas y calle Guerrero	100	1 613.61
Total			**1 650**	

En la figura 15 se muestra el área con peligro bajo-nulo para los diferentes criterios de peligro. Destaca el criterio de peligro de FEMA para periodos de retorno menores a cien años, que abarca un área menor de peligro por inundación. En el periodo de retorno de cien años, el criterio de la OFEE es el que abarca un área mayor de peligro, seguido del criterio de Dórrigo y el propuesto por el IMTA-Conagua-Conacyt (2015). Para periodos de retorno mayores a 200 años, los criterios de Dórrigo y OFEE presentan las áreas mayores de peligro por inundación.

En cuanto al peligro medio, las áreas de peligro se muestran en la figura 16. El criterio de la OFEE presenta un área mayor de peligro nulo, seguido del criterio de la FEMA; en tercer lugar está el criterio del IMTA-Conagua-Conacyt, y por último el de Dórrigo.

ISSN 2007-2422

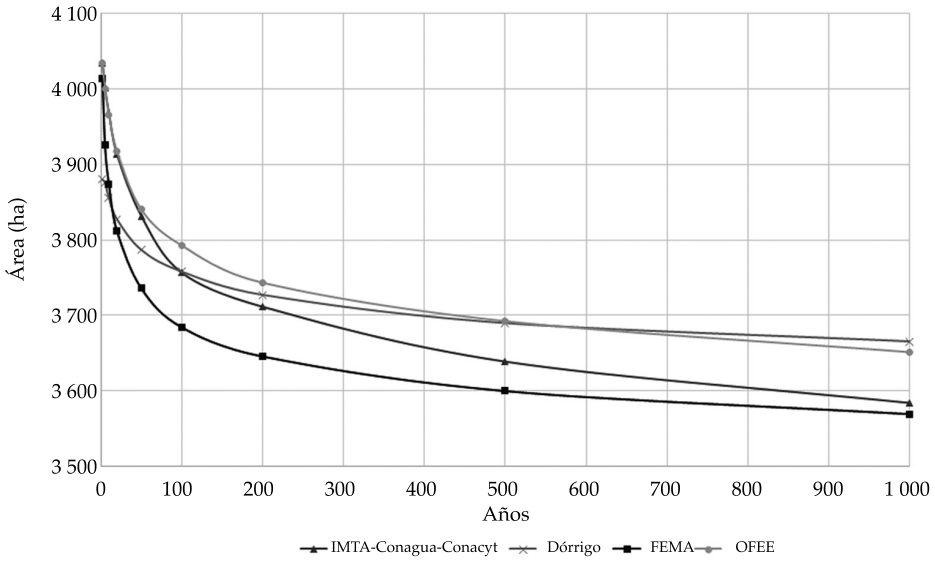


Figura 15. Nivel de peligro por inundación (bajo).

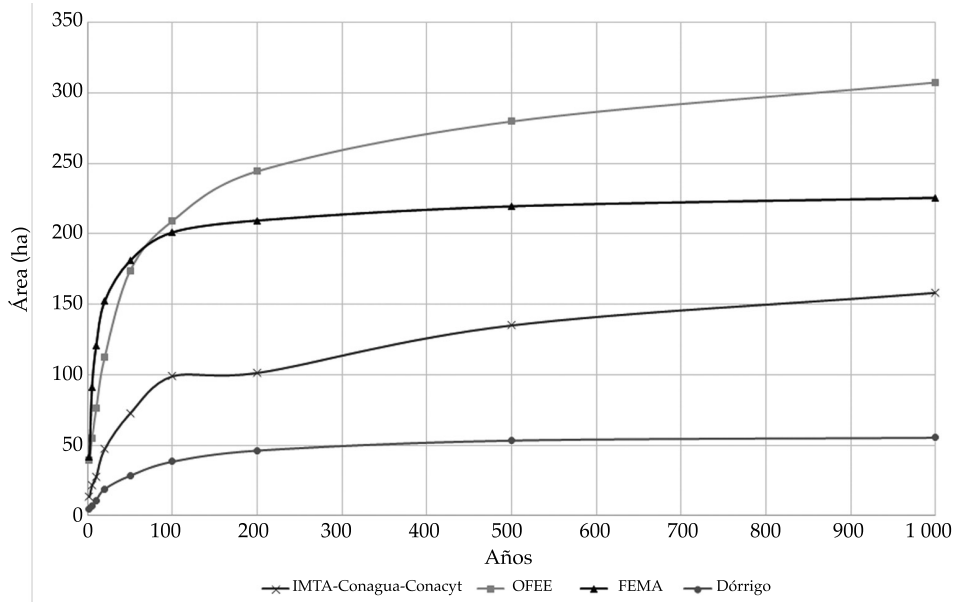


Figura 16. Nivel de peligro medio por inundación.

En cuanto a las áreas de peligro alto, mostrada en la figura 17, el criterio de Dórrigo es el que abarca la mayor área, seguido del criterio de FEMA, IMTA-Conagua-Conacyt y por último el de OFEE.

Revisión de las zonas de refugio

La configuración espacial de las zonas de refugio en Tuxtla Gutiérrez se establecieron después de un evento hidrometeorológico

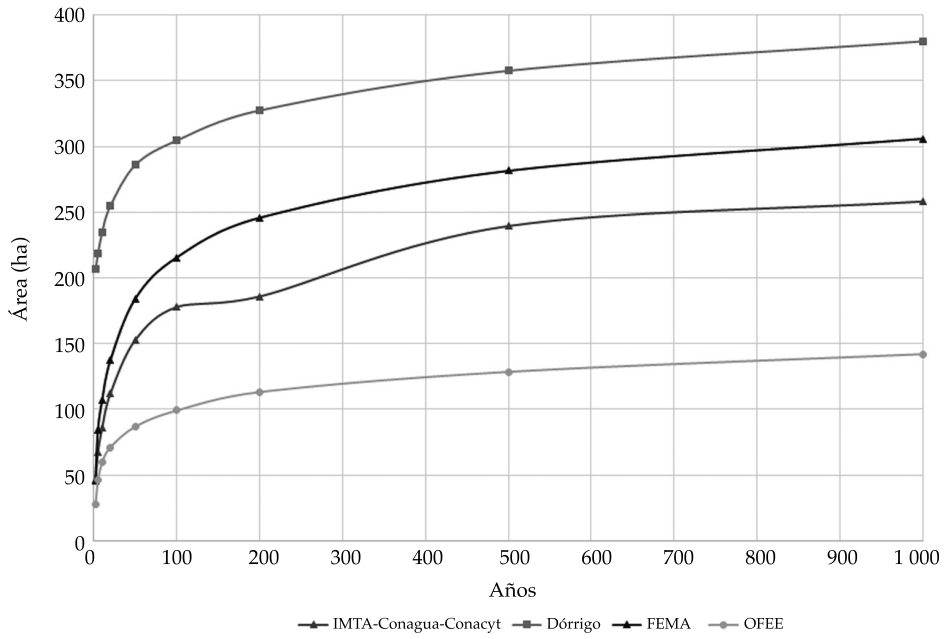


Figura 17. Nivel de peligro alto por inundación.

extremo (huracán *Stan*), que generó graves problemas en el municipio, por lo cual se dispusieron refugios en toda el área. Diez años después se requiere conocer si la zona no se encuentra en peligro por inundación, por lo que se necesita la revisión de cada uno de estos refugios.

La revisión a los refugios se efectúa con una lluvia de diseño vinculada con un periodo de retorno de 200 años (la más desfavorable entre las analizadas). De los 17 refugios establecidos, sólo se presentan afectaciones en seis de ellos. El cuadro 10 muestra la localización de los refugios afectados.

La figura 18 señala la ubicación geoespacial de los seis refugios afectados a causa de las inundaciones vinculadas con un periodo de retorno de 200 años.

Cuadro 10. Zonas de refugio afectadas a causa de una lluvia vinculada con un *Tr* de 200 años.

Zonas de refugio afectadas en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas				
Núm.	**Nombre**	**Dirección**	**Personas**	**Área (m²)**
1	Casa Taller de Artes y Oficios para Niños	Libramiento Norte Oriente y Blvd. Fidel Velázquez 1a, Col. 24 de Junio	100	17 114.39
3	Casa del Abuelo	Andador Los Cocos 42, Col. Albania Baja	50	13 660.85
6	Centro de Convenciones	Calzada Andrés Serra Rojas y Libramiento Norte	100	173 801.88
8	Casa Pastoral	3a Sur y 4a Oriente, Plazuela San Roque	200	14 203.2
9	Auditorio Municipal	2a Sur entre 3a y 4a Oriente, Col. Centro	800	1 422.86
15	Plan de Ayala	Blvd. Vicente Fox Quesada, Col. Plan de Ayala	100	996.28
Total			**1 650**	

ISSN 2007-2422

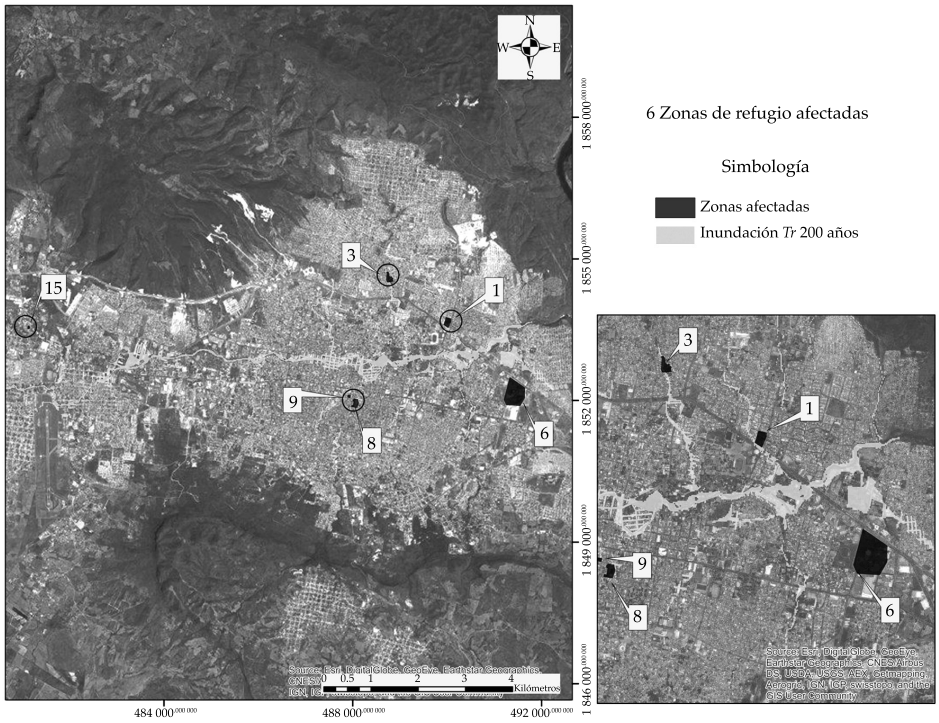


Figura 18. Zonas de refugio afectadas a causa de la lluvia para un *Tr* de 200 años.

Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló una metodología para la construcción de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas, integrados por la combinación de los mapas de peligro y vulnerabilidad. La aportación de estos mapas radica fundamentalmente en la consideración para los mapas de peligro de los factores del deslizamiento y vuelco que se puede presentar por las inundaciones. En los mapas de vulnerabilidad se puede obtener un análisis de bajo costo enfocado a conocer la vulnerabilidad de la población e infraestructura. Además, esta metodología considera el establecimiento de refugios y trazo de rutas de evacuación, análisis de daños a la infraestructura y menaje de las casas.

En cuanto a los criterios de peligro, es importante considerar en la generación de mapas de peligro por inundación un peligro nulo, pues ciertos tirantes y velocidades no afectan la población e infraestructura, lo que hace más representativo el análisis de tales mapas.

Los modelos de simulación hidráulica se vuelven una herramienta importante en el análisis de inundaciones, donde es posible analizar toda una zona urbana en su conjunto y considerar de forma integral el escurrimiento en calles, infraestructura pluvial existente, arroyos y ríos.

Los mapas de riesgo por inundación permiten calcular los costos probables por daños por inundación en menaje de casa e infraestructura; asimismo, se vuelven una herramienta para determinar rutas de evacuación óptimas de la población hacia los refugios en la ciudad.

Agradecimientos

El estudio que se reporta en este artículo fue realizado en el marco del proyecto "Estudio de riesgo de inundaciones en zonas urbanas de la República Mexicana", financiado por el Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua Conacyt-Conagua. Los autores agradecen a Conacyt y Conagua tal financiamiento, y el apoyo brindado para alcanzar los objetivos y resultados fijados en este proyecto.

• ISSN 2007-2422

Referencias

Alcocer-Yamanaka, V., Rodríguez, J. M., Albornoz, P. M., Maldonado, J., López, J. A., Alonso, J. A., & Quiñones, J. R. (julio-septiembre, 2012). Manejo de aguas pluviales de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo. Revista *Agua en Quintana Roo*, 2(4), 9-14.

Cenapred (2004). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos* (p. 386). México, DF: Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Cenapred (2006). *Guía básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Fenómenos hidrometeorológicos*. México, DF: Centro Nacional de Prevención de Desastres, Sistema Nacional de Protección Civil.

Cenapred (2007). *Inundaciones* (pp. 3-32). Series de fascículos. México, DF: Centro Nacional de Prevención de Desastres.

FEMA (2009). Recuperado en abril de 2010 de http://www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=3587.

Gieck, K. (1981). *Manual de fórmulas técnicas* (p. 105). Sección A-5. México, DF: Rep. y Servicios de Ingeniería S.A.

IMTA (2015) *Estudio de riesgos de inundaciones en zonas urbanas de la república mexicana del Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua (FSIDSA) Conagua-Conacyt. Clave del proyecto: Conagua-2011-167009*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

INEGI (2010). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Recuperado de http://www.inegi.gob.mx.

Instituto de Protección Civil (2015). Recuperado de http://www.proteccioncivil.gob.mx.

Instituto de Protección Civil (2004). *Estudio de aprovechamiento hidráulico integral de contro de inundaciones de la cuenca del río Sabinal*. Tuxtla Gutiérrez, México: FOPREDEN y Gobierno del Estado de Chiapas.

Instituto Estatal del Agua (s.f.). *Instituto Estatal del Agua, Chiapas*. Recuperado de http://www.institutodelagua.chiapas.gob.mx/cuencasabinal.

Kelman, I. (2002). *Physical Flood Vulnerability of Residential Properties in Coastal, Eastern England*. Dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy. Cambridge, UK: University of Cambridge.

Loat, R., & Petrascheck, A. (1997). *Prise en compte des dangers dus aux crues dans la cadre des activités de l'aménagement du territoire, Dangers Naturels*. Bienne, Switzerland: Ofiice Fédéral de l'Economie des Eaux (OFEE), Office Fédéral de l'Aménagement du Territoire (OFAT), Office Fédéral de l'Environnement des Forets et du Paysage (OFEFP).

Nanía, L. S. (1999) Metodología Numérico Experimental para el análisis del riesgo asociado a la escorrentía pluvial en una red de calles. Tesis doctoral. Barcelona: Universidad Polytecnica de Catalunya.

NSW (2005) *Floodplain Development Manual, the Management of Flood Liable Land*. Queensland, Australia: News South Wales Government, Department of infrastructure, Planning and Natural Resources.

Ribera, L. R. (2004). Los mapas de riesgo de inundaciones: representación de la vulnerabilidad y aportación de las innovaciones tencológicas. *Doc. Anál. Georg. 43*, 18.

Velez, M., Fuentes, M., Rubio, G., & De Luna, C. (2014). *Mapas de peligro por inundación como herrramienta para la evaluación del riesgo de daño de viviendas*. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica, Puerto Vallarta, Jalisco, México.

Dirección institucional de los autores

Dr. Víctor Hugo Alcocer Yamanaka
M.I. Víctor Javier Bourguett Ortiz

Comisión Nacional del Agua
Av. Insurgentes Sur 2416, Delegación Coyoacán
04340 Ciudad de México, México
Teléfono: +52 (55) 51744 000
yamanaka@conagua.gob.mx
vbourgue@gmail.com

M.I. José Manuel Rodríguez Varela
M.I. Oscar Jesús Llaguno Guilberto
M.I. Pedro Misael Albornoz Góngora

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso
62550, Jiutepec, Morelos, México
Teléfono: +52 (777) 3293 600, extensiones 516 y 366
manuel_rodriguez@tlaloc.imta.mx
oscar_llaguno@tlaloc.imta.mx
ptrsmsl@gmail.com

Haga clic aquí para escribir al autor

Deslave de cerro generado por lluvias continuas, septiembre de 2013, colonia 6 de Junio, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

Foto: Manuel Rodríguez Varela.

Nota técnica

La necesidad del desarrollo de servicios hidrológicos para la reducción de daños por inundaciones

• Angel Luis Aldana-Valverde* •
Consultor de la Organización Meteorológica Mundial
*Autor para correspondencia

Resumen

Aldana-Valverde, A. L. (septiembre-octubre, 2016). La necesidad del desarrollo de servicios hidrológicos para la reducción de daños por inundaciones. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *7*(5), 57-62.

Los problemas de las inundaciones requieren enfoques integrales en los que se aúnen esfuerzos de diferentes tipos de estrategias, complementarias entre sí, con participación de muy diversos agentes debidamente coordinados. Pero en la raíz de todas las soluciones está la información hidrológica, en cantidad y calidad suficientes, y con la máxima responsabilidad sobre la misma están los servicios hidrológicos. Estas instituciones, que pueden estar formadas por varias unidades, cuentan con niveles de exigencias crecientes, dados los problemas que van apareciendo en adición a los antiguos. Los nuevos retos pueden alcanzarse con ayuda de los nuevos avances técnicos y científicos, pero exigen el liderazgo de profesionales con cualificación alta y entrenamiento especializado. Tales soluciones, en las que el sector privado puede tener un papel importante, tienen un coste económico, pero es muy pequeño, en comparación con las pérdidas que se producen por las inundaciones. México está en la línea correcta para la reducción de pérdidas por inundaciones, aunque tiene que asumir la necesidad de un gran esfuerzo para completar el proceso.

Palabras clave: inundaciones, avenidas, crecidas, servicios hidrológicos, recursos humanos, modernización, formación, entrenamiento.

Abstract

Aldana-Valverde, A. L. (September-October, 2016). The Necessity of the Development of Hydrological Services for the Reduction of Flood Damages. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 7(5), 57-62.*

The inundations problems require integral approaches for joining forces from different types of strategies, complementary between them, with the participation of many stakeholders who have to be properly coordinated. But the hydrological information is the base of all solutions, with requirements in quantity and quality, and it is the responsibility on the part of the hydrological services. These institutions, which can be constituted by several units, have increasing demands, due to the new problems that appear in addition to the former ones. New technical and scientific advances make easier new challenges, but they need the leadership of highly qualified professionals and specially trained. These solutions, in which the private sector can play an important role, have a cost, but it is very small compared to the losses caused by flooding. Mexico is on the right way for reducing flood losses, but it must assume the need for a major effort to complete the process.

Keywords: *Floods, inundations, hydrological services, human resources, modernization, training and education.*

Recibido: 20/06/2015
Aceptado: 03/11/2015

Reconocimiento internacional de la importancia de los servicios hidrológicos

Los problemas relacionados con el agua, tanto en su componente recurso como en el de amenaza, exigen que cada país cuente con una serie de medios para la obtención y manejo de información hidrológica. Los servicios hidrológicos nacionales (SHN) son las instituciones que pueden satisfacer las necesidades de información y, además, proporcionar conocimiento y asesoramiento sobre la realidad del agua a todo el público y, en particular, a los responsables de las tomas de decisiones. Estos servicios pueden ofrecer el fundamento para procesos racionales de toma de decisiones.

"El informe de la Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente (CIAMA), celebrada en Dublín en enero de 1992 (Naciones

Unidas, 1992a), ofrece una evaluación convincente de la importancia de los recursos hídricos para el medio ambiente mundial y para la economía del planeta. Sus afirmaciones específicas en materia de políticas subrayan muy eficazmente el papel que deberían desempeñar los servicios hidrológicos en la consecución de las metas vinculadas al desarrollo sostenible" (OMM, 2011).

"Los procedimientos de alerta temprana eficaces deberían formar parte de las estructuras institucionales y legislativas nacionales y complementarse con servicios profesionales, actividades de formación y creación de capacidad y la asignación estratégica de los recursos" (Jan Egeland, secretario general adjunto de Asuntos Humanitarios y coordinador del Socorro en Emergencias, Naciones Unidas) (EIRD, 2004).

Pero no hay que olvidar la importancia que también pueden tener los servicios hidrológicos de ámbitos territoriales menores o los de entidades distintas de las administrativas, como pueden ser los de empresas hidroeléctricas.

Medidas de reducción de daños por inundaciones

Los daños por inundaciones pueden reducirse con diferentes tipos de acciones: algunas que se llevan a cabo antes de que se presente la amenaza, otras mientras sucede la crecida y unas más después de que se haya producido el daño:

- Antes de que se presente la amenaza: mitigación (medidas orientadas reducir el riesgo), prevención (se refiere a las medidas que tratan de evitar el riesgo por completo; EIRD, 2009) y preparación (acciones para aumentar capacidad de respuesta).
- Durante: las medidas de respuesta que se aplican mientras se presenta el fenómeno.
- Después: las acciones de recuperación (rehabilitación del funcionamiento normal de la comunidad afectada y reconstrucción de los bienes destruidos).

Por otra parte, las medidas de mitigación y prevención pueden clasificarse en estructurales y no estructurales. Las primeras podrían definirse como: "cualquier construcción física para reducir o evitar los posibles impactos de las amenazas" (EIRD 2009), mientras que las segundas son las que no emplean soluciones físicas, por lo que también pueden denominarse como actividades de gestión (políticas y leyes; una mayor concienciación pública; capacitación y educación, etc.).

La lucha de una sociedad para la reducción de daños por inundación será exitosa si y sólo si se combina el conjunto de acciones posibles de forma coherente y coordinada, como defiende el concepto de gestión integrada de crecidas (APFM, 2006).

La importancia de la información hidrológica

Cada una de las medidas antes referidas requiere información hidrológica, con exigencias tanto en cantidad como en calidad:

- Antes de que se presente la amenaza: planificación y diseño de medidas tanto estructurales como no estructurales con base en un rigor técnico y científico que impone un soporte de información completa. En esta fase del conjunto de actuaciones, los análisis estadísticos asentados en series históricas largas serán fundamentales.
- Durante: la información que se recopila en tiempo real (con necesidades variables y específicas para cada problema en cuanto a disponibilidad de datos) es imprescindible para dotar a la sociedad de capacidad de anticiparse a las posibles consecuencias de un determinado fenómeno adverso y poner en práctica las medidas apropiadas. Es aquí cuando los sistemas de monitoreo y pronóstico juegan un papel importante.
- Después: la información en tiempo real será necesaria mientras se va rehabilitando el funcionamiento normal de la comunidad afectada. Pero la reconstrucción debe orientarse a corregir errores anteriores (siempre los hay en procesos, como el de

• ISSN 2007-2422

la lucha contra las inundaciones, que se ve obligada a seguir un ciclo continuo de reajustes), planteamiento que requiere rigor técnico basado en estudios, que a su vez precisa información.

Además, esta información será muy útil para situaciones de sequía, gestión de los recursos hídricos y vigilancia medioambiental.

Cantidad y calidad

Todo dato hidrológico tiene asociado error e incertidumbre. No hay medidas exactas, por lo que es necesario encontrar un equilibrio entre el coste de reducir el error de medida y la incertidumbre asumible en la práctica de actuaciones basadas en esos datos. Un error grande en las medidas hidrológicas puede convertirlas en inútiles en un proceso de toma de decisiones o, lo que es peor, llevar a una decisión equivocada. Por ello, a medida que se agravan los problemas asociados con el agua, aumentan las exigencias en cuanto a cantidad, pero también sobre la calidad de información hidrológica. Esta necesidad de una calidad mínima implica asumir un costo, no sólo en inversión inicial de la infraestructura correspondiente, sino también en mantenimiento y operación. La calidad requiere validación en campo y oficina, y siempre debe considerarse dentro de un esquema de trabajo en el que, paso a paso, desde la medida hasta el cálculo de variables derivadas, se vaya asegurando la calidad de información.

El deseo de mejorar las capacidades de observación del ciclo hidrológico en su conjunto lleva a administradores e, incluso, a especialistas a desarrollar redes de medida muy extensas, con un elevado número de estaciones (puntos en los que se realizan las mediciones). Pero, por lo dicho antes en cuanto a la calidad de la información, el número de estaciones de medida debe ser tal que se asegure, con los medios destinados para ello, un mantenimiento adecuado y explotación de datos rigurosa con apropiados controles de calidad.

La responsabilidad de un servicio hidrológico nacional

El Reglamento de Hidrología de la OMM (OMM, 2006) presenta una enumeración extensa y detallada de las funciones que se asocian con un Servicio Hidrológico Nacional (SHN). Sin entrar en tal nivel de detalle, la definición de sus funciones se puede sintetizar asociando las máximas responsabilidades dentro de un país en cuanto a recopilación, generación y difusión de información hidrológica con una institución o conjunto de instituciones (el SHN), que en conjunto cumplen con los compromisos correspondientes tanto acerca de información histórica como sobre requerimientos más actuales. Cabe organizar el servicio hidrológico de muchas formas posibles, pero lo importante es que se desempeñe la función básica necesaria para la sociedad.

Organismos de cuenca y servicios hidrológicos

Algunos países cuentan con la ventaja de seguir el modelo de organización administrativa del agua que se considera más apropiado: el que ajusta los ámbitos geográficos de gestión del agua con las divisorias naturales de las cuencas hidrológicas. México o España son ejemplos de naciones donde se sigue este modelo ejemplar, cuyas ventajas deben aplicarse también en la organización de un servicio hidrológico.

La proximidad geográfica de los puntos donde se realizan los actos de medir y validar la información debe respetarse en la medida de lo posible. El contraste de medidas aconseja un cierto nivel de agregación de información, y que aquellos que validan datos tengan una cierta visión general, pero éstos no deben estar muy alejados de la realidad que representan las medidas. De igual modo, el tiempo borra huellas, por lo que la validación debe hacerse lo antes posible, de manera inmediata a la medida. Puede encontrarse un equilibro en reconocer amplias responsabilidades en la gestión de la información hidrológica a los organismos de

ISSN 2007-2422 • *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 57-62

cuenca, donde se encontrará además una coherencia entre ámbitos naturales, de gestión y redes de medida. Pero también es necesaria una entidad nacional que coordine, homogenice y supervise subredes nacionales.

Coordinación de servicios hidrológicos

Una red de medida tiene que ajustarse, por razones económicas y funcionales, a ciertas necesidades y presupuestos. Por otro lado, dada la complejidad del mundo de la hidrología, en el que coexisten problemas con escalas espaciales y temporales muy diversas, es imposible concebir redes de medida de cuencas y, menos aún, redes nacionales que satisfagan todas las necesidades de cada una de las partes de la sociedad. Así, estas partes, ya sean poblaciones o entidades, se verán en la necesidad de desarrollar redes específicas para problemas y circunstancias concretos.

La coordinación en la concepción de las redes, diseño, operación y mantenimiento tendrá grandes ventajas, especialmente para aquellos que necesitan soluciones específicas para su problema particular, pues pueden y deben apoyarse en redes más extensas.

La coordinación de servicios hidrológicos dentro de una nación es necesaria, pero también lo es la coordinación de servicios hidrológicos nacionales de diferentes países, en particular si son limítrofes y comparten partes de cuencas de ríos transfronterizos.

El coste de la información

La información tiene un coste, como ya se ha venido anunciando, en inversión, mantenimiento y operación. Ahora bien, este gasto es muy pequeño, comparado con las cuantías económicas de los daños por inundación y con las que se asocian los diferentes usos del agua (abastecimiento, riego, industria, aprovechamientos hidroeléctricos, etc.). La información hidrológica puede contribuir a reducir daños o mejorar la gestión del agua, por lo que el empleo de recursos en su obtención, tratamiento y uso lleva a ventajas económicas. También es necesario considerar la reducción de alteraciones del funcionamiento normal de la sociedad debido a los efectos de las inundaciones, que puede lograrse con información apropiada. En cualquier caso, la reducción de pérdidas de vidas humanas justifica, por sí sola, el gasto, pues cualquier sociedad con un mínimo de aprecio y valoración por la vida y derechos humanos tiene que hacer grandes esfuerzos para alcanzar tal objetivo ineludible. Este gasto, que garantiza un servicio público esencial, debe ser asumido por toda nación.

La importancia de los recursos humanos

Buena parte del costo económico de un buen servicio hidrológico moderno, capaz de ofrecer productos útiles de acuerdo con las nuevas exigencias y preparado para afrontar los nuevos retos que surgen, está en los recursos humanos. La tecnología actual ofrece la posibilidad de contar con servicios hidrológicos que generan información muy útil en situaciones adversas. Pero estas nuevas tecnologías exigen perfiles profesionales especiales. El hidrólogo operacional necesita conocimientos avanzados en múltiples disciplinas y un periodo largo de entrenamiento en la práctica profesional. Incluso las labores de los aforos directos (medidas de precisión en ríos y canales para conocer los volúmenes circulantes), que de manera tradicional han sido realizadas por personal de baja cualificación, exigen ahora la participación directa de recursos humanos especializados; esto, si se desea que tales medidas tengan la precisión que la técnica actual permite alcanzar.

Las nuevas exigencias implican nuevos retos que sólo pueden afrontarse con personal de alta cualificación, capaz de aprovechar las posibilidades científicas y técnicas actuales. Esto requiere esfuerzos iniciales de incorporación en los servicios hidrológicos de personal bien y adecuadamente formado en la universidad, y exige la puesta en práctica de programas continuos de formación y entrenamiento.

• ISSN 2007-2422

Terciarización

La tendencia actual de los gobiernos de la mayoría de los países es reducir o, al menos, no aumentar el número de empleados públicos. Por otro lado, los servicios hidrológicos necesitan recursos humanos, además de recursos materiales correspondientes, en volúmenes que pueden ser crecientes si el servicio está en desarrollo o modernización. La terciarización (o externalización) aparece entonces como una solución obligada para esta situación contradictoria. Tal opción también puede ser necesaria cuando se requieren perfiles profesionales especializados o recursos materiales singulares. En el caso de los servicios hidrológicos, puede ser recomendable dotar a la administración o entidad de un núcleo de personas mínimo que garantice continuidad de los trabajos a lo largo del tiempo. Además, en coherencia con algunas leyes de agua, puede ser obligado que determinadas tareas de los servicios hidrológicos de la administración sean desempeñadas por un funcionario o empleado público.

La terciarización parcial puede tener muchas ventajas. El dinamismo, la flexibilidad y la capacidad de adaptación de las empresas privadas son virtudes que pueden y deben ser aprovechadas. Es capaz de aportar personal capacitado y medios materiales gestionados en un marco más flexible que el de una administración, lo que facilita el desempeño de muchas tareas y funciones, y el logro de objetivos de un servicio hidrológico: reposiciones de materiales, renovaciones, movilidad de personal y medios, mantenimiento de almacenes de repuestos… La dificultad estará en fijar de manera objetiva el tamaño mínimo de núcleo del servicio tanto en cuanto a recursos materiales como en relación con el capital humano.

La solución anterior es la de un servicio hidrológico de la entidad que opera con apoyo externo. Pero también cabe una solución extrema en la que todas las funciones son desempeñadas por una entidad privada, con personal y medios materiales propios. La empresa funcionaría como algún tipo de concesionaria, que explota una infraestructura, parte propia y parte de la administración (en caso de que cuente con estaciones con registros históricos), para proveer ciertos servicios.

Los tres modelos (recursos propios, apoyo externo o externalización completa) cuentan con ventajas e inconvenientes. La opinión subjetiva del autor de este trabajo está en favor de la solución intermedia; pero quizá la mejor estrategia sea la aplicación de cada modelo según cada caso y situación. En un país en el que los asuntos hidrológicos se lleven según las cuencas hidrográficas, seguro se observarán organismos de cuenca muy distintos entre sí, por lo que la aplicación de una u otra opción deberá contemplarse en relación con las singularidades de cada uno.

El caso de México

Los avances en la reducción de pérdidas por inundaciones que se observan en México son importantes, como lo demuestra el hecho de que los fenómenos hidrometeorológicos *Ingrid* y *Manuel* en 2013, y la tormenta tropical *Boris* en 2014 tuvieron como resultado un saldo blanco en el estado de Chiapas (razón por la cual el Consejo Estatal de Protección Civil del Estado de Chiapas recibió el Premio Nacional de Protección Civil 2014) (DOF, 2014). En el territorio mexicano hay muchos y variados problemas relacionados con las inundaciones, pero se llevan adelante varias líneas de actuación orientadas a mejorar la situación. Se puede decir que, aunque aún le queda mucho por hacer, el país está en la dirección correcta. En el caso especial del Servicio Hidrológico Nacional, tanto a nivel central como de los organismos de cuenca, varias acciones en marcha están conduciendo a su modernización, con creación de nuevas capacidades (OMM-MEX, 2015). Pero la nación tendrá que apostar fuerte para completar este proceso, destinando para ello los recursos necesarios.

Corolario (a modo de conclusión)

Aunque mucho de lo antes expuesto pudiera parecer obvio a algunos lectores, la realidad no

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 57-62
ISSN 2007-2422

demuestra que los análisis y planteamientos correspondientes se tengan siempre en cuenta. Es por ello que los especialistas que conocen el sector (tanto los que participan en los avances científicos y técnicos como los que afrontan soluciones de problemas en la práctica operacional) deben hacer un esfuerzo de concienciación sobre la necesidad de la información hidrológica con exigencias en cantidad y en calidad, como fundamento de toda solución para la reducción de daños por inundaciones, y sobre la importancia de los servicios hidrológicos en asegurar dicha base.

Referencias

APFM (2006). *Aspectos sociales y participación de los interesados en la gestión integrada de crecidas*. Ginebra: APFM. Recuperado de http://www.apfm.info/pdf/ifm_social_aspects_Sp.pdf.

DOF (2014). *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado de http://www.chiapas.gob.mx/noticias/entrega-epn-premio-nacional-de-proteccion-civil-al-consejo-estatal-de-proteccion-civil-de-chiapas.

EIRD (2004). *Vivir con el riesgo. Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres. Versión 2004*. Ginebra: Organización de las Naciones Unidas. Recuperado de http://www.eird.org/vivir-con-el-riesgo/index2.htm.

EIRD (2009). *Terminología sobre reducción del riesgo de desastres*. Ginebra: Organización de las Naciones Unidas.

OMM (2006). *Reglamento técnico. Volumen III. Hidrología*. OMM núm. 49. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial.

OMM (2011). *Guía de prácticas hidrológicas. Volumen I. Hidrología – De la medición a la información hidrológica* (6ª ed.). OMM núm. 168. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial. Recuperado de http://library.wmo.int/opac/.

OMM-MEX (2015). Web de la Oficina de la OMM en México. México, DF: Organización Meteorológica Mundial. Recuperado de http://www.omm-mex.info/.

Dirección institucional del autor

Dr. Angel Luis Aldana-Valverde

Consultor de la Organización Meteorológica Mundial
angel.l.aldana@prohimet.org
https://docs.com/angel-luis-aldana-valverde

Haga clic aquí para escribir al autor

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 57-62
• ISSN 2007-2422

La política pública contra la sequía en México: avances, necesidades y perspectivas

• Felipe I. Arreguín-Cortés • Mario López-Pérez* • David Ortega-Gaucin •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
*Autor para correspondencia

• Óscar Ibañez-Hernández •
Comisión Nacional del Agua

Resumen

Arreguín-Cortés, F. I., López-Pérez, M., Ortega-Gaucin, D., & Ibañez-Hernández, O. (septiembre-octubre, 2016). La política pública contra la sequía en México: avances, necesidades y perspectivas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *7*(5), 63-76.

Se presentan las acciones que se generaron a partir de la sequía del periodo 2010-2012 en México, la cual fue el detonador para un cambio paradigmático en la manera de atender este fenómeno, al pasar de la reacción frente a las emergencias hacia un modelo preventivo orientado a la gestión del riesgo. En ese contexto se formuló una política pública nacional al respecto, donde el Programa Nacional contra la Sequía (Pronacose) se constituyó en el eje rector. Los fundamentos de este programa —prevención y mitigación— constituyen las bases sobre las cuales se busca mejorar la gestión *versus* las sequías y fortalecer las capacidades locales para afrontar sus impactos con estrategias adecuadas. Este esfuerzo de la administración pública federal se inserta, aporta y retroalimenta a los esfuerzos internacionales que la Organización Meteorológica Mundial, Convención contra la Desertificación de Naciones Unidas, Fondo Mundial para la Alimentación, *Global Water Partnership* y otros organismos de escala mundial han emprendido para fomentar la generación y el fortalecimiento de políticas nacionales para atender la sequía. Se discuten algunas líneas de acción emprendidas en esta política pública, y se señalan varios elementos que aún no se han implementado o es incipiente su realización.

Palabras clave: sequía, política pública, México.

Abstract

Arreguín-Cortés, F. I., López-Pérez, M., Ortega-Gaucin, D., & Ibañez-Hernández, O. *(September-October, 2016). Public Policy against Drought in Mexico: Progress, Needs and Perspectives*. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 7(5), 63-76.*

The actions that were generated from the drought of the 2010-2012 period in Mexico, were the detonator for a paradigm shift in the way to address this phenomenon, from reaction to emergencies towards a preventive risk management-oriented. In this context a national public policy to address drought was made, where the national program against drought (Pronacose) was incorporated as the steering shaft. The foundations of this program —prevention and mitigation— forms the basis on which seeks to improve the management of drought and strengthen local capacities to cope with its impacts with appropriate strategies. This effort of the federal public administration is inserted and provides feedback to international efforts that the Meteorological Organization World, Convention on desertification United Nations Global Fund for food, Global Water Partnership and other worldwide agencies have undertaken to promote the generation and strengthening of national policies to address the drought. The lines of action undertaken with this public policy are shown as well as several elements that have not yet been implemented or its implementation is starting.

Keywords: Drought, public policy, Mexico.

Recibido: 07/02/2016
Aceptado: 12/07/2016

El contexto reciente

La sequía es un evento natural que ocurre de manera recurrente en México, pues la mayor parte de su territorio tiene características de aridez y crecimiento urbano con patrones de consumo inadecuados. Los problemas de desabasto de agua para consumo humano tienden a agravarse, aun sin considerar los efectos de la sequía y del cambio climático. Es así que el cumplimiento al mandato constitucional de garantizar el acceso humano al agua está en riesgo.

Por otro lado, la seguridad alimentaria nacional es un tema prioritario frente a una sequía extendida y prolongada, donde es trascendental tomar medidas de política social, económica y fiscal para garantizar el abasto de alimentos en el país, potenciar las capacidades productivas del sector rural y definir los cupos de importación de granos básicos, en particular de frijol y maíz blanco para consumo humano.

La sequía de 2010 a 2012 motivó la búsqueda de una mejor gestión de este fenómeno, mediante la articulación de esfuerzos nacionales. Por tanto, se publicaron el "Decreto por el que se ordena a la Comisión Nacional del Agua establecer las medidas de prevención y control de los efectos provocados por fenómenos meteorológicos extraordinarios y se instruye a las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal a coordinarse y brindar todos los apoyos necesarios a dicha Comisión" (Semarnat, 2010); el "Acuerdo por el que se instruyen acciones para mitigar los efectos de la sequía que atraviesan diversas entidades federativas" (Semarnat, 2012a), y los "Lineamientos que establecen los criterios y mecanismos para emitir acuerdos de carácter general en situaciones de emergencia por la ocurrencia de sequía, así como las medidas preventivas y de mitigación, que podrán implementar los usuarios de las aguas nacionales para lograr un uso eficiente del agua durante sequía" (Semarnat, 2012b).

El 10 de enero de 2013 se puso en operación el Programa Nacional contra la Sequía (Pronacose), a fin de atender de manera integral este fenómeno. La atención integral implica la identificación e implementación de acciones para la toma de decisiones oportunas para la prevención y mitigación, acordando con las autoridades locales los programas y acciones necesarias para atender condiciones particulares en cada cuenca y usuario de agua nacional.

En este trabajo se analizan el contexto y los principales elementos de la política nacional para atender los efectos de la sequía en México, como son su orientación y coincidencias en el contexto internacional, impactos recientes, acciones implementadas para atender sus efectos, marco institucional correspondiente y propiamente la política pública nacional contra la sequía.

Las políticas públicas mexicanas contra la sequía en el contexto internacional

En el mundo, la sequía ha afectado varios países, principalmente de África, y se prevé un aumento de daños derivados del impacto del cambio climático en los diferentes sectores socioeconómicos y el medio ambiente. La elaboración de políticas públicas nacionales que atiendan la sequía depende por lo general de circunstancias locales, como la capacidad institucional y prioridades de cada país, y no es fácil que se tomen medidas proactivas en lugar de reactivas, aun cuando es conocido que esta última manera de enfrentar el problema tiene implicaciones económicas y humanas más costosas.

En julio de 2011 se desarrolló un simposio internacional para abordar las políticas nacionales sobre sequía, auspiciado por la Organización Meteorológica Mundial (WMO) y la Secretaría de la Convención de las Naciones Unidas de la Lucha contra la Desertificación (UNCCD), en colaboración con otras organizaciones internacionales y regionales. Entre las conclusiones, se estableció que las políticas nacionales deben considerar las regiones, los distintos grupos de la población y sectores económicos, y favorecer el desarrollo sustentable. Se señaló que el principio fundamental de las políticas se debe basar en la gestión del riesgo a través de medidas de

• ISSN 2007-2422

prevención y mitigación. Es decir, reducir el riesgo de una sequía mediante el desarrollo de una mayor conciencia y comprensión del peligro de este fenómeno, y las causas que producen la vulnerabilidad social (WMO/UNCCD, 2011).

De igual forma, se estableció que los principios del manejo de riesgo se deben trabajar mediante el fomento y la aplicación de medidas de prevención a corto plazo; el desarrollo de un sistema de alerta temprana que integre vigilancia y difusión eficiente de la información; la elaboración de planes de preparación en los distintos niveles de gobierno; la adopción de medidas y programas de mitigación; la creación de programas de respuesta a la emergencia, que garantice las soluciones puntuales y específicas; y, por último, proporcionar una estructura organizacional que mejore la coordinación intergubernamental y las partes interesadas.

Con el mismo objetivo de impulsar el cambio de paradigma (de un enfoque reactivo a uno preventivo), se desarrolló en Ginebra, del 11 al 15 de marzo de 2013, una Reunión de Alto Nivel de Políticas Públicas Nacionales sobre Sequía (HMNDP). En esa reunión participaron representantes de varios países, incluido México. En dicho foro se desarrollaron tres documentos principales: uno científico, otro de política y la declaración final (WMO/UNCCD, 2013a, 2013b y 2013c, respectivamente).

El documento científico (WMO/UNCCD, 2013a) abordó las prácticas idóneas en materia de políticas nacionales para la gestión de la sequía. Señala que la práctica más común en la gestión de este fenómeno es la intervención gubernamental después del impacto, e incluye medidas de emergencia que básicamente consisten en proporcionar dinero u otro tipo de ayuda concreta. Este enfoque reactivo resulta ser el más inadecuado por el tiempo que tarda el ejercicio de los recursos y el daño se prolonga.

Un segundo tipo de política empleada es la creación de programas gubernamentales preventivos, para disminuir la vulnerabilidad y repercusiones de la sequía. En el contexto de los peligros naturales, estos planes son como medidas de atenuación; las repercusiones no son estructurales y están referidas a sistemas integrales de alerta temprana, a mejoras en las predicciones estacionales y a la promoción de la cultura del ahorro del agua.

Un tercer tipo de política se enfoca a la elaboración y aplicación de los planes y programas que contemplan marcos de organización y acciones operativas que se establecen antes de la sequía y que los gobiernos deben mantener vigentes, a fin de tener una mayor capacidad institucional, tomando en cuenta los diferentes usuarios. Así, la sequía se aborda con la elaboración e implementación de programas gubernamentales orientados hacia la reducción del riesgo. En general, los elementos de esta política son:

- Fomentar enfoques normalizados para evaluar la vulnerabilidad y sus repercusiones.
- Utilizar sistemas eficaces de vigilancia y alerta temprana.
- Trabajar en medidas de prevención y mitigación.
- Aplicar medidas de respuesta y atención de emergencias.
- Cuantificar el costo de no realizar acciones.

Por otra parte, el documento de Política Nacional de Gestión de Sequía (WMO/UNCCD, 2013b) parte de que las sequías han sido y son causa de sufrimiento humano, y tienen consecuencias fatales, como la pérdida de vidas humanas, pérdidas económicas a corto y largo plazos, inseguridad alimentaria, degradación de los recursos naturales, consecuencias negativas sobre la flora y la fauna, pobreza y malestar social. Considera que el cambio climático probablemente modifique la frecuencia y gravedad de los fenómenos extremos, y entonces aumente el riesgo de tener consecuencias adversas ante el fenómeno. Además refiere que investigaciones recientes han demostrado que las sequías aumentan las posibilidades de violencia entre las comunidades, provocando incluso guerras civiles o entre naciones.

Establece que las nuevas políticas deben ser complementarias de las iniciativas nacionales

ISSN 2007-2422

e internacionales, con el objeto de reforzar la seguridad alimentaria, reducir la vulnerabilidad de los sectores más pobres de la sociedad y ayudar a fomentar el crecimiento. Los objetivos básicos de estas políticas nacionales incluyen:

- Establecer medidas dinámicas de mitigación y planificación del manejo de riesgos, divulgación de las acciones y administración de recursos.
- Fomentar la colaboración de redes de información en los diferentes niveles, desde lo local hasta lo internacional.
- Incorporar planes de preparación ante sequías, así como seguros privados y gubernamentales de amplia cobertura.
- Definir una red de seguridad basada en la gestión de los recursos naturales.
- Vincular la política nacional con los programas y otras políticas y respuestas conexas de manera eficaz y orientada hacia el usuario.

El documento de declaración (OMM/UNCCD, 2013c) señala la estrecha relación entre sequías, degradación de las tierras y desertificación, e incluye recomendaciones y propuestas de acciones. Se indica el uso de tecnología disponible, aumentar la resiliencia de la sociedad y propiciar decisiones más sólidas de planificación e inversión, así como aprovechar los avances científicos en la predicción del clima, para elaborar nuevos instrumentos y servicios que conduzcan hacia una mejor gestión del fenómeno.

El mismo documento señala que es necesario contar con una coordinación intersectorial de evaluación de la vulnerabilidad ante la sequía y la gestión del fenómeno, así como con medidas emergentes y de respuesta rápida que se enfoquen en la gente más vulnerable.

En este orden de ideas, la Organización Meteorológica Mundial (WMO) y la Asociación Mundial para el Agua (GWP) iniciaron conjuntamente el Programa de Gestión Integrada de Sequías (IDMP). En octubre de 2013 se constituyó el Comité Asesor del IDMP en la WMO en Ginebra, Suiza, y se estableció el plan de trabajo para el resto de 2013 y hasta finales de 2014. Entre otras tareas incluyó el apoyo para el desarrollo del Pronacose de México durante los siguientes seis años, tomando en cuenta que el principal objetivo del programa es "Prestar apoyo a las partes interesadas en todos los niveles proporcionándoles orientación sobre políticas y gestión e intercambiando información científica, conocimientos y mejores prácticas en apoyo de la gestión integrada de sequías" (WMO/GWP, 2015).

Desde entonces México participa en las reuniones de alto nivel y firmó las declaraciones que se desarrollaron durante la reunión en Ginebra en 2013, donde asumió los principios fundamentales del cambio de paradigma en atención a las sequías, con sus principales objetivos y líneas de acción. Al mismo tiempo, México comparte la experiencia del trabajo que desarrolla en la implementación de la política nacional contra la sequía; mantiene un acompañamiento permanente, incluyendo el desarrollo de capacidades; y aprende de las experiencias de otros países que están desarrollando sus propias políticas de sequía.

Acciones recientes del gobierno para atender los efectos de la sequía en México

A lo largo de su historia, México ha padecido los efectos negativos de las sequías, desde la época prehispánica hasta la actualidad, tal como lo muestran los registros documentados durante las diversas etapas del desarrollo nacional (SARH, 1980; Florescano, 2000).

En años recientes, la peor sequía en el país se registró en 2011 y se agravó en 2012. Se considera la peor en siete décadas y se estima que originó pérdidas mayores a 16 mil millones de pesos, según el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA). La Comisión de Agricultura de la Cámara de Diputados de México (2014) estimó un costo de 150 mil millones de pesos.

• ISSN 2007-2422

La sequía afectó un 90% del territorio nacional. Prácticamente todo el país se encontraba con algún grado de sequía. Los estados más afectados fueron Aguascalientes, Chihuahua, Coahuila, Durango, Guanajuato, Jalisco, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora y Zacatecas. A pesar de todas las carencias existentes y de que las medidas adoptadas fueron reactivas, algunos la consideran la mejor atendida en el país, ya que hubo coordinación intersecretarial.

El 25 de enero de 2012 se publicó en el *Diario Oficial de la Federación* (DOF) el acuerdo por el que se instruyeron acciones para mitigar los efectos de las sequías en las entidades federativas más afectadas por dicho fenómeno. En el acuerdo se establece la coordinación de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT); Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat); Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa); Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol); Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP); Comisión Nacional del Agua (Conagua); Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA), y Financiera Rural, para que desarrollaran conjuntamente acciones de mitigación ante la sequía presentada en 2011. El presupuesto federal asignado para las acciones fue de alrededor de 37 mil millones de pesos.

Se decidió trabajar sobre tres vertientes:

a) Componente humanitaria: abasto de agua a la población (especialmente en 10 estados donde las fuentes de agua se agotaron) y protección del ingreso familiar.
b) Componente productiva: apoyar al empleo en las zonas afectadas, mantener las capacidades productivas, activar esquemas de aseguramiento y esquema de financiamiento.
c) Componente de infraestructura: manejo adecuado de agua y uso sustentable de recursos naturales con nuevas fuentes de abastecimiento (pozos y galerías) y construcciones en 110 000 hectáreas, que disminuyen las pérdidas del agua en distritos y unidades de riego (revestimiento de canales).

Todas estas actividades obedecieron a un entorno de corto plazo, considerando que la sequía es un evento recurrente con intervalos de lluvia normalizados. La estrategia que se instrumentó para financiar las obras y acciones fue utilizar los programas federalizados como el medio para la distribución de los recursos, subsidiando contrapartes y combinando dinero del Fondo de Desastres Naturales (Fonden) para ayudar a los municipios donde se hicieron las declaratorias de desastre correspondientes (240 municipios).

Mediante el Componente de Atención a Desastres Naturales en el Sector Agropecuario y Pesquero (Cadena) se atendieron a más de 600 municipios en las entidades más afectadas antes mencionadas, así como en Baja California, Baja California Sur, Colima, Nayarit, Nuevo León, Oaxaca, Querétaro, Quintana Roo, Tamaulipas, Tlaxcala y Veracruz.

El despliegue de la acción gubernamental en distintos frentes por la última sequía evidenció la necesidad de cambiar el enfoque de atender emergencias por otro que involucre más a las comunidades locales, y busque prevenir y mitigar los efectos de los fenómenos mediante mecanismos de alerta temprana y participación ciudadana. Otros aprendizajes valiosos incluyeron reconocer las distintas características asociadas con cada región, y la falta de capacidad institucional y recursos humanos especializados para entender los fenómenos, y plantear medidas preventivas diferentes y viables para cada caso, además de contar con mecanismos de coordinación interinstitucional e intergubernamental eficaces.

Marco institucional en materia de sequía en México

En el artículo 4 de la Ley de Aguas Nacionales (LAN) se establece que corresponde al Ejecutivo Federal la autoridad y administración en materia de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes, el que las ejercerá directamente o a través de la Comisión Nacional del Agua.

ISSN 2007-2422

En el artículo 7, fracción IX, de la LAN, se declara de utilidad pública la prevención y atención de los efectos de fenómenos meteorológicos extraordinarios que pongan en peligro a las personas, áreas productivas o sus instalaciones. También, en el artículo 9, fracción L, de esta misma LAN, se establece que la Autoridad del Agua, mediante la expedición de "Acuerdos de carácter general", podrá tomar las medidas necesarias, normalmente de carácter transitorio, para que en situaciones de emergencia, escasez extrema o sobreexplotación, se garantice el abasto de agua para uso doméstico y público urbano.

Para evitar conflictos sociales, los "Lineamientos que establecen los criterios y mecanismos para emitir acuerdos de carácter general en situaciones de emergencia por la ocurrencia de sequía, así como las medidas preventivas y de mitigación, que podrán implementar los usuarios de las aguas nacionales para lograr un uso eficiente del agua durante sequía" —publicados en el DOF el 22 de noviembre de 2012— establecen una serie de pasos a seguir en caso de que la Conagua, conforme a las "Condiciones Generales" de los títulos de concesión y asignación de agua, establezca restricción parcial o total de los volúmenes concesionados y/o asignados.

Además, la LAN señala en su artículo 9, fracción XXVI, que la Conagua promoverá un uso eficiente del agua y su conservación en todas las fases del ciclo hidrológico; asimismo, impulsará el desarrollo de una cultura del agua que considere a este elemento como recurso vital, escaso y de alto valor económico, social y ambiental, por lo que constituye una prioridad nacional proteger la vida de las personas y garantizar la continuidad de sus actividades durante una sequía.

También en el artículo 47 BIS de la citada LAN se establece que la Conagua promoverá entre los sectores público, privado y social el uso eficiente del agua en las poblaciones y centros urbanos; el mejoramiento en la administración del agua en los sistemas respectivos, y las acciones de manejo, preservación, conservación, reúso y restauración de las aguas residuales aun en situaciones de sequía.

Además existen otros instrumentos legales fundamentales para el desarrollo e implementación de la política pública para la atención de la sequía: la Ley General de Cambio Climático, la Estrategia Nacional de Cambio Climático, el Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018 y el Programa Nacional Hídrico 2014-2018.

La Ley General de Cambio Climático (LGCC), publicada en el DOF el 6 de junio de 2012, establece las disposiciones para enfrentar los efectos adversos del cambio climático, entre las cuales está la necesidad de tomar conciencia y estar prevenidos para enfrentar fenómenos hidrometeorológicos extremos como la sequía. De la LGCC se deriva la Estrategia Nacional de Cambio Climático, publicada en el DOF el 3 de junio de 2013 (Semarnat, 2013a), en la cual se especifican los pilares de la política nacional de adaptación a los efectos del cambio climático; se incluyen escenarios climáticos, una evaluación y diagnóstico de la vulnerabilidad, y la capacidad de adaptación del país.

Por su parte, el Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018 (Gobierno de la República, 2013) establece las acciones a seguir en el corto plazo en materia de adaptación al cambio climático, y la atención preventiva y oportuna de la sequía, así como el alertamiento.

Como parte de la articulación de la planeación nacional, el Programa Nacional Hídrico 2014-2018 (Conagua, 2014a) retoma los elementos contemplados en el Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018 ya mencionados y establece varios objetivos para su cumplimiento. En él se definen dos estrategias para atender el tema de la sequía: proteger e incrementar la resiliencia de la población y áreas productivas en zonas de riesgo de inundación y/o sequía, y reducir la vulnerabilidad a los efectos del cambio climático o variabilidad climática.

Política pública nacional contra la sequía

En la implementación de la política pública de atención a la sequía, el Pronacose debe ser el eje fundamental, de acuerdo con la Estrategia 2.1 establecida en el Objetivo 2 del Programa Nacional Hídrico 2014-2018, que se orienta a proteger

• ISSN 2007-2422

e incrementar la resiliencia de la población y áreas productivas en zonas de riesgo frente a sequías e inundaciones.

Esta política nacional necesita contemplar una vertiente de interacción internacional que permita beneficiarse de esfuerzos exitosos en otros países, como Brasil, España, Estados Unidos, Nicaragua, Sudáfrica, Suiza y Turquía, y al mismo tiempo aportar, con base en la experiencia propia, al desarrollo de políticas nacionales contra la sequía en otros países, en congruencia con el Objetivo 6 del Programa Nacional Hídrico 2014-2018, en donde se contempla consolidar la participación de México en el contexto internacional en materia de agua.

Sin duda la experiencia estadounidense y el desarrollo de sus planes es quizá la referencia más relevante que México ha considerado. Las herramientas y criterios desarrollados por el Centro Nacional de Mitigación de Sequía (NDMC), los formatos y programas desarrollados por los estados de Arizona, California, Colorado, Nuevo México y Texas se adaptaron a la Guía para la Formulación de los Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía (PMPMS), desarrollada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2013), así como de algunas de las medidas y recomendaciones para el manejo de sequía en los sectores de uso urbano y agropecuario.

El otro gran referente es la experiencia española, donde indudablemente la elaboración de los PMPMS por consejo de cuenca es la expresión mexicana similar a la utilizada en aquel país como unidad básica de planeación e implementación.

El enfoque australiano en la cuenca Murray Darling es especialmente valioso para el contexto agropecuario mexicano en situación de sequía. De la experiencia china se valora el enfoque preventivo, la necesidad de involucrar a los diferentes niveles de gobierno y el énfasis en la responsabilidad de los gobiernos locales. Los instrumentos de gestión mexicanos son relativamente recientes y seguramente se irán desarrollando a medida que se tenga mayor experiencia en su aplicación.

En este contexto, la política pública para la sequía en México se ilustra en la figura 1.

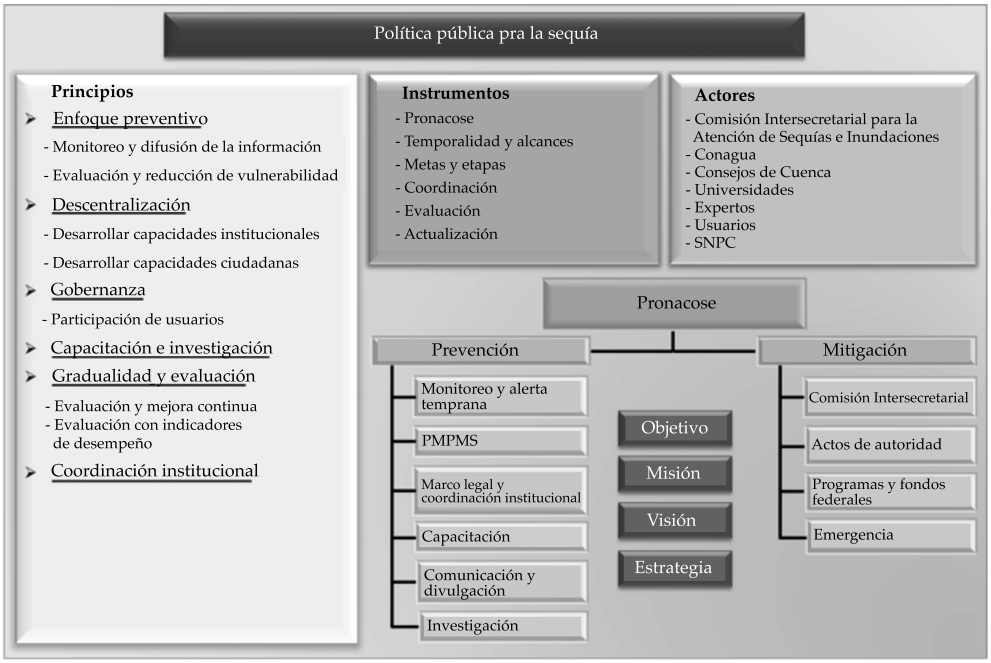


Figura 1. Componentes de la política pública para la sequía en México. Fuente: elaboración propia.

ISSN 2007-2422

Avances en el Programa Nacional Contra la Sequía (Pronacose)

El Pronacose se desarrolla en la actualidad en un contexto de transición entre paradigmas e instrumentos gubernamentales de gestión. Así, ante cualquier evento de sequía, México sigue atendiendo a la población a través de los mecanismos tradicionales de respuesta con recursos federales de programas establecidos para atención de emergencias del Sistema Nacional de Protección Civil (Sinaproc); el Plan DN-III (Plan de Auxilio a la Población Civil en Casos de Desastre) de la Secretaría de la Defensa Nacional (Sedena); el Plan Marina de la Secretaría de Marina (Semar); el Fondo para la Atención de Desastres Naturales (Fonden) de la Secretaría de Gobernación (Segob), y el Componente Atención a Desastres Naturales en el Sector Agropecuario y Pesquero (Cadena) de la Secretaría de Agricultura, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa).

En paralelo, se implementa el Pronacose, cuyo objetivo es elaborar los programas de medidas para prevenir y enfrentar la sequía a nivel de cuenca o grupos de usuarios, desarrollar capacidad institucional local, y al mismo tiempo coordinar y ejecutar acciones para mitigar sequías existentes.

Hoy día, los 26 Consejos de Cuenca del país cuentan con su respectivo Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía (PMPMS) (Conagua, 2014b), y se realizan evaluaciones y actualizaciones periódicas con participación de los miembros de los Consejos de Cuenca para mejorar los programas, que requieren ser actualizados en el cuarto año de su elaboración, buscando que estén listos al final de la presente administración federal y garanticen la continuidad de los trabajos. A nivel nacional se cuenta con un instrumento de coordinación interinstitucional que previene y da seguimiento a las contingencias.

La estrategia de descentralizar la gestión de la sequía de manera gradual es fundamental. Esto implica fortalecer las actividades para involucrar a los usuarios de agua y a los afectados por la sequía, generar capacidad local y cambiar el enfoque reactivo hacia un modelo preventivo de administración de riesgos. Mientras se desarrolla la capacidad humana e institucional a nivel de cuenca, es vital atender el fenómeno de la sequía de manera tradicional a nivel nacional con el apoyo de la Comisión Intersecretarial para Atención de las Sequías e Inundaciones (CIASI) creada con carácter permanente por el Gobierno Federal en 2013 (Semarnat, 2013b).

También se ha conformado un Comité Técnico de Expertos en Sequía (CTES), que sirve a varios propósitos: apoyar en la formulación y revisión de los PMPMS, proponer líneas de investigación para mejorar la implementación de los programas y hacer recomendaciones que permitan mejorar el Pronacose.

El monitoreo de las condiciones de la sequía requiere de distintos instrumentos técnicos de comunicación para generar alertas tempranas. El más importante es el Monitor de Sequía en México, un producto que se elabora desde 2014 y utiliza varios índices; se actualiza quincenalmente y ubica los distintos grados de sequía en el territorio. Se emplea no sólo para alertar las condiciones prevalecientes de sequía, sino también para detonar las acciones reactivas cuando ésta es severa o superior en intensidad, mediante la publicación de acuerdos de carácter general de inicio y cierre de ocurrencia de sequía, donde se precisan las acciones a seguir, pero siempre basadas en los PMPMS (DOF 10 abril 2015). México también elabora reportes con las condiciones climatológicas que ayudan a estimar condiciones potencialmente detonantes de fenómenos de sequía por temporadas, con antelación de hasta tres meses; sin embargo, estos instrumentos no son propiamente pronósticos, pero es información que junto con otros indicadores permite ajustar medidas preventivas.

Otros instrumentos son los índices de precipitación estandarizada (SPI) y de sequía por escurrimiento (SDI) en presas y estaciones hidrométricas. Los índices arrojan valores asociados con condiciones de sequía, que a su vez sirven para detonar acciones de alerta temprana y medidas que pueden ser especificadas en cada programa preventivo.

• ISSN 2007-2422

Principios y líneas de acción

Se han identificado seis principios que guían los esfuerzos de esta política pública, los ajustes que se realizan durante la implementación de la misma, o a partir de la evaluación los resultados:

1) *Enfoque preventivo.* Esta política busca que el enfoque sea preventivo y de adaptación paulatina, pero sistemática a los efectos de la sequía; ello implica que los ámbitos locales sean los primeros en atender este fenómeno, por lo que requieren contar con las capacidades de acción necesarias en materia de monitoreo y difusión de la información, así como evaluaciones de vulnerabilidad como base para desarrollar programas de adaptación y mitigación.
2) *Descentralización.* Los fenómenos de sequía tienen carácter y particularidades regionales que hacen obligada su atención desde una perspectiva local. Conforme a la Ley de Aguas Nacionales respecto de la administración del agua por cuencas con el concurso de los Consejos de Cuenca, la orientación de la política es desarrollar su capacidad institucional para una mejor respuesta al fenómeno natural. En este orden de ideas, es necesario que las autoridades y usuarios locales adopten, en coordinación con los demás actores en cada cuenca, región o sector, medidas preventivas (incluyendo organismos operadores de sistemas de abasto de agua y distritos de riego) voluntarias u obligatorias para prevenir los efectos y minimizar los impactos de la sequía. La socialización de estas medidas debe ser gradual, pero consistentemente evaluada, para lograr una real retroalimentación.
3) *Gobernanza.* La única manera de que las acciones de prevención y adaptación trasciendan administraciones gubernamentales federales, estatales y municipales es involucrar a actores económicos, sociales, ciudadanos y gubernamentales (primero a través de los Consejos de Cuenca), a universidades locales y luego ampliando la participación a través de programas específicos para los principales usuarios.
4) *Capacitación e investigación.* La capacitación sobre conceptos acerca de la sequía y casos de éxito es obligado y debe contar con el mayor número de expertos nacionales e internacionales para fortalecer las soluciones a las necesidades detectadas durante el proceso de desarrollo de los PMPMS. Al mismo tiempo, es indispensable realizar la investigación sobre el fenómeno natural mismo; las medidas alternativas que puedan usarse para mejorar las alertas tempranas; la evaluación de las medidas implementadas; su costo-beneficio, y la atención al fenómeno en las actualizaciones de los programas, igual que la implementación de la política pública en general. La investigación debe considerar los escenarios de cambio climático y dirigir los ajustes de la política de acuerdo con los resultados de la misma.
5) *Gradualidad y evaluación.* La elaboración e implementación de programas de manera gradual, iniciando con Consejos de Cuenca hasta llegar al ámbito de los usuarios especiales, es relevante. Sin embargo, la gradualidad también ayudará a que los programas se mejoren de modo paulatino, utilizando la experiencia de implementación de las primeras medidas asumidas. La socialización de las medidas y su evaluación debe contribuir a que la adopción de éstas ayude a reducir la vulnerabilidad y solo así serán más efectivas y quizá necesariamente más estrictas.
6) *Coordinación institucional.* La articulación y alineación de los programas de las instituciones federales a la política preventiva, apoyada en la CIASI y en grupos de trabajo cuya misión sea orientar y evaluar el Pronacose, permite actuar de forma coordinada, enfocada y transversal en el ámbito de la administración federal, pero al mismo tiempo fondear las acciones propuestas por los actores locales a nivel de cuenca, incidiendo en la reducción de la vulnerabilidad identificada y en los daños a grupos más vulnerables.

ISSN 2007-2422

Se identifican dos principales líneas de acción como parte de la implementación de la política pública: a) prevención (monitoreo-alertamiento, programas por cuenca, por usuario o uso, investigación, evaluación y actualización de los programas), y b) mitigación o atención (que incluye acciones durante y después del evento de sequía) (Conagua, 2014b).

Instrumentación de la política pública

La implementación de los elementos de la política pública debe considerar los siguientes componentes: a) temporalidad y alcances; b) participantes; c) metas y etapas; d) coordinación; e) seguimiento, y f) evaluación y actualización.

a) *Temporalidad y alcances*

La política pública debe trascender el tiempo de la administración por sus características de implementación a largo plazo, pues involucra un cambio de paradigma y una ejecución gradual en distintos ámbitos a nivel nacional. Por tanto, es necesario que sea asumido por las instancias derivadas de los Consejos de Cuenca y con aplicación en los distintos ámbitos de gobierno estatal y municipal, con el objetivo de trascender los tiempos de las administraciones gubernamentales. En este periodo debe vincularse con el Sinaproc y en particular con los protocolos de protección civil estatales, ya que tanto los aspectos de prevención como los de mitigación están asociados con la protección civil en las localidades.

b) *Participantes*

Los principales actores de la política pública y el Pronacose son las distintas secretarías y dependencias federales que conforman la CIASI; usuarios de agua representados a través de los Consejos de Cuenca; académicos e investigadores de las universidades, e integrantes del Comité de Expertos en Sequía.

c) *Metas y etapas*

La meta principal de la política pública es establecer un nuevo paradigma de atención a la sequía, que lleve a un enfoque preventivo en lugar de uno reactivo y trascienda las administraciones sexenales. Para lograr lo anterior se requiere:

1. Primera etapa (bianual):

- Divulgar la nueva política a través de un documento rector.
- Implementar los principios y elementos de la política vía Pronacose.
- Divulgar los productos de los instrumentos de monitoreo y alerta temprana.
- Establecer un programa de capacitación constante para todos los actores involucrados en el Pronacose.
- Operación de la Comisión Intersecretarial para Atender las Sequías e Inundaciones, a fin de implementar y dar seguimiento a la nueva política en el ámbito federal.
- Operación del Comité de Expertos.
- Revisar de forma permanente los programas federales para su alineación.
- Implementar 26 Programas de Medidas de Prevención y Mitigación a la Sequía (PMPMS), correspondientes a cada Consejo de Cuenca y principales usuarios del agua.
- Desarrollar las líneas de investigación sobre sequía: causas, efectos, documentación e instrumentos para mejorar su gestión.
- Desarrollar una campaña de comunicación y difusión del Pronacose.
- Atender los efectos de la sequía en proceso.

Prácticamente todas las acciones enlistadas ya iniciaron su implementación durante 2013 y 2014; sin embargo, algunas requieren reforzarse.

2. Segunda etapa (bianual):

- Lanzar la campaña de divulgación para sensibilizar sobre los nuevos instrumentos.

• ISSN 2007-2422

- Instrumentar la nueva política a través del seguimiento de lo establecido en cada PMPMS por Consejo de Cuenca.
- Fortalecer el financiamiento del desarrollo de las líneas de investigación.
- Evaluar y adecuar, en su caso, los índices e instrumentos de monitoreo y alerta temprana en el ámbito regional.
- Iniciar el proceso de homologación de variables, para definir vulnerabilidades y evaluar el impacto de las acciones preventivas en la reducción del riesgo de sequía.
- Fortalecer la implementación de los PMPMS por usuarios principales en las cuencas.
- Continuar la capacitación continua para implementar y evaluar los PMPMS de cuenca y usuarios.
- Atender los casos de sequía que se presenten utilizando los nuevos instrumentos.
- Iniciar la vinculación de los PMPMS con el Sinaproc y sus contrapartes estatales.

La mayor parte de las acciones enlistadas se instrumentaron durante 2015, aunque quedan pendientes que requieren ser ejecutadas en 2016.

3. Tercera etapa (quinto año):

- Evaluar la implementación de los PMPMS.
- Actualizar los PMPMS.
- Alinear PMPMS y planes de principales usuarios por cuenca como parte de los procesos de evaluación y actualización.
- Vincular los PMPMS con el Sinaproc y sus contrapartes estatales.
- Actualizar los mapas de riesgo estatales del Sinaproc, incluyendo los asociados con sequía.
- Realizar una campaña de información y divulgación que destaque el proceso de evaluación y actualización.

Las acciones correspondientes a esta etapa deben implementarse durante 2017.

4. Cuarta etapa (sexto año):

- Implementar los PMPMS actualizados.
- Realizar una campaña de divulgación para sensibilizar sobre los nuevos instrumentos.
- Evaluar la política pública nacional.

Estas últimas acciones deben ser llevadas a cabo durante 2018.

d) *Coordinación*

La coordinación general debe ser a través de la CIASI. Asimismo, el grupo de trabajo a cargo de la revisión de los programas federales y que reporta a la CIASI para vincular el Pronacose con otros programas del gobierno federal, como la Cruzada contra el Hambre, y las acciones de protección desarrolladas por el Fonden y otros instrumentos de coberturas por fenómenos hidrometeorológicos en el gobierno federal requiere una coordinación estrecha. Se necesita la vinculación con el Sinaproc para que no sea un programa sexenal y al mismo tiempo pueda ser vinculatorio en los ámbitos estatal y municipal, que es donde mayores acciones se deben desarrollar de acuerdo con el nuevo enfoque.

La coordinación de acciones entre ámbitos de gobierno debe ser a través de los Consejos de Cuenca y los instrumentos locales definidos en cada caso por los PMPMS y coordinados con las autoridades estatales de Protección Civil.

d) *Seguimiento*

El decreto que constituye la CIASI (DOF, 5 de abril 2013), establece en su artículo tercero, número II: "Definir y coordinar la instrumentación de las estrategias nacionales en materia de sequías e inundaciones". Así, la CIASI establecerá los procedimientos para hacer el seguimiento a la instrumentación de esta política pública.

Cada vez que se presente un evento de sequía se requieren documentar todas las acciones que se desarrollen e inversiones ejercidas. Al final del evento, un informe que incluya por lo menos lo siguiente es fundamental:

ISSN 2007-2422

- Impactos sociales, económicos y ambientales atribuibles a la sequía.
- Acciones y presupuesto aplicado por dependencia y por otros ámbitos de gobierno.
- Evaluación del funcionamiento de las acciones establecidas en cada Consejo de Cuenca y usuario por su respectivo PMPMS.
- Evaluación del funcionamiento de los sistemas de monitoreo y alertamiento durante la sequía.
- Recomendaciones para mejorar.

f) *Evaluación y actualización*

La evaluación de la política pública debe ser a través de sus instrumentos con base en los procedimientos establecidos en los mismos y hacerse de manera sistemática en algunos de sus elementos particulares, conforme a la experiencia que se vaya detectando en su implementación. Sin embargo, con el objeto de actualizar dichos instrumentos, se necesita una evaluación anual que documente y sirva como base para plantear modificaciones y la actualización de los mismos.

Como parte del programa de capacitación, evaluación y mejora continua, son indispensables las reuniones regionales y nacionales para revisar las experiencias de implementación de los PMPMS, promover el intercambio de experiencias a nivel nacional y proponer actualizaciones que se estén desarrollando en el ámbito internacional.

Los temas mínimos que se deben evaluar son la calidad y difusión del monitoreo; protocolos de alerta temprana y umbrales asociados; datos para determinar vulnerabilidad y sus variaciones anuales, y por último, la pertinencia de las acciones recomendadas cuando se hayan implementado.

Conclusiones

La sequía generalizada del periodo 2010-2012 fue el detonador para un cambio paradigmático en la manera de atender este fenómeno, al pasar de la reacción frente a las emergencias hacia un modelo preventivo orientado a la gestión del riesgo. En ese contexto se formuló una política pública nacional para atender la sequía, donde el Programa Nacional contra la Sequía (Pronacose) se constituyó en eje rector. Los fundamentos de este programa —prevención y mitigación— constituyen las bases sobre las cuales se busca mejorar la gestión de las sequías y fortalecer las capacidades locales, para afrontar sus impactos con estrategias adecuadas.

Además, se construyeron algunos elementos legales e institucionales, como la creación de la Comisión Intersecretarial para la Atención de Sequías e Inundaciones (CIASI) y sus grupos de trabajo, al igual que el Comité de Expertos, que permite, además de acompañar, asesorar y evaluar el programa, plantear los temas de investigación indispensables para consolidar el nuevo enfoque.

Este esfuerzo de la administración pública federal se inserta, aporta y retroalimenta los esfuerzos internacionales que la Organización Meteorológica Mundial, Convención contra la Desertificación de Naciones Unidas, Fondo Mundial para la Alimentación, *Global Water Partnership* y otros organismos de escala mundial han emprendido para fomentar la generación y fortalecimiento de políticas nacionales para atender la sequía.

La puesta en marcha de algunas líneas de acción emprendidas en esta política pública permiten aglutinar los recursos de los distintos programas federales para la atención de la sequía y propiciar una adecuada coordinación entre los diferentes niveles de gobierno y la participación activa de la sociedad, para tener una actuación más eficaz y mejores resultados la próxima vez que ocurra una sequía.

Sin embargo, hay varios elementos de la política que aún no se han implementado o es incipiente su realización. La actual política nacional todavía no ha permeado lo suficiente en las dependencias e instituciones del gobierno federal y en los Consejos de Cuenca para señalarse que es una realidad. Es de aceptar que requiere más tiempo para su asimilación y

• ISSN 2007-2422

consolidación, pero quizá el mayor riesgo que puede enfrentar la política es que se le evalúe como si ya estuviera concluida su implementación y se le descalifique por los actuales resultados. Aparte del tiempo, la política necesita un mayor compromiso institucional para orientar los actuales recursos presupuestales, humanos y materiales hacia la prevención y gestión del riesgo.

Una renovación de la voluntad política manifestada en enero de 2013 es deseable, así como la evaluación objetiva de medio término, y fortalecer la participación de instituciones de educación superior y de la sociedad organizada.

Reconocimiento

El presente trabajo está basado en el desarrollo de las actividades relacionadas con el Programa Nacional contra la Sequía de los dos primeros autores durante su periodo de trabajo en la Comisión Nacional del Agua, institución a la que manifiestan todo su reconocimiento y agradecimiento.

Referencias

Cámara de Diputados (1992). *Ley de Aguas Nacionales*. Recuperado de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_110814.pdf.

Cámara de Diputados (2014). *Ley General de Cambio Climático*. Recuperado de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC_161014.pdf

Conagua (2014a). Programa Nacional Hídrico 2014-2018. México, DF: Comisión Nacional del Agua. Recuperado de http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/PNH2014-2018.pdf.

Conagua (2014b). Programa Nacional Contra la Sequía (Pronacose). México, DF: Comisión Nacional del Agua. Recuperado de http://www.pronacose.gob.mx/

Florescano, E. (2000). *Breve historia de la sequía en México* (2ª ed.). México, DF: Consejo Nacional para la Cultura y las Artes (Conaculta).

Gobierno de la República (2013). Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. Recuperado de http://www.sev.gob.mx/educacion-tecnologica/files/2013/05/PND_2013_2018.pdf.

IMTA (2013). *Guía para la formulación de Programas de Medidas Preventivas de Mitigación de la Sequía*. Coordinación de Hidrología. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

SARH (1980). *Análisis histórico de las sequías en México*. México, DF: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos/Comisión de Plan Nacional Hídrico.

Semarnat (2010). Decreto por el que se ordena a la Comisión Nacional del Agua establecer las medidas de prevención y control de los efectos provocados por fenómenos meteorológicos extraordinarios y se instruye a las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal a coordinarse y brindar todos los apoyos necesarios a dicha Comisión. *Diario Oficial de la Federación*, 9 de septiembre. México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5158514&fecha=09/09/2010&print=true.

Semarnat (2012a). Acuerdo por el que se instruyen acciones para mitigar los efectos de la sequía que atraviesan diversas entidades federativas. *Diario Oficial de la Federación*, 25 de enero. México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5231010&fecha=25/01/2012

Semarnat (2012b). Lineamientos que establecen los criterios y mecanismos para emitir acuerdos de carácter general en situaciones de emergencia por la ocurrencia de sequía, así como las medidas preventivas y de mitigación, que podrán implementar los usuarios de las aguas nacionales para lograr un uso eficiente del agua durante sequía. *Diario Oficial de la Federación*, 22 de noviembre. México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5278695

Semarnat (2013a). Acuerdo por el que se expide la Estrategia Nacional de Cambio Climático. *Diario Oficial de la Federación*, 3 de junio. México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5301093&fecha=03/06/2013.

Semarnat (2013b). Acuerdo por el que se crea la Comisión Intersecretarial para la Atención de Sequías e Inundaciones. *Diario Oficial de la Federación*, 5 de abril. México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de http://www.normateca.gob.mx/Archivos/57_D_3447_11-04-2013.pdf.

WMO/GWP (2015). Integrated Drought Management Programme. Organización Meteorológica Mundial/Asociación Mundial para el Agua. Recuperado de http://www.droughtmanagement.info/.

WMO/UNCCD (2011). International Symposium on Drought and National Drought Policies. Organización Meteorológica Mundial/Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación. Recuperado de http://climate-l.iisd.org/events/international-symposium-on-drought-and-national-drought-policies/.

WMO/UNCCD (2013a). *Documento científico. Prácticas idóneas en materia de políticas nacionales para la gestión de la sequía*. Reunión de alto nivel de políticas nacionales sobre sequía. Ginebra, International Conference Center (CICG),

del 11 al 15 de marzo, Organización Meteorológica Mundial/Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación.

WMO/UNCCD (2013b). *Documento de política. Política nacional de gestión de sequía.* Reunión de alto nivel de políticas nacionales sobre sequía. Ginebra, International Conference Center (CICG), del 11 al 15 de marzo, Organización Meteorológica Mundial/Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación.

WMO/UNCCD (2013c). *Documento declaración. Prácticas idóneas en materia de políticas nacionales para la gestión de la sequía.* Reunión de alto nivel de políticas nacionales sobre sequía. Ginebra, International Conference Center (CICG), del 11 al 15 de marzo, Organización Meteorológica Mundial/Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación.

Dirección institucional de los autores

Dr. Felipe Ignacio Arreguín-Cortés

Director general
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, México
Teléfono: +52 (777) 3 28 36 00, extensión 313
felipe_arreguin@tlaloc.imta.mx

M.C. Mario López-Pérez

Coordinador de Hidrología
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, México
Teléfono: +52 (777) 3 28 36 00, extensión 345
mario_lopezperez@tlaloc.imta.mx

Dr. David Ortega-Gaucin

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, México
Teléfono: +52 (777) 3 28 36 00, extensión 674
dortega@tlaloc.imta.mx

Dr. Óscar Ibañez-Hernández

Comisión Nacional del Agua
Insurgentes Sur 2416, piso PH,
Colonia Copilco El Bajo
04340, Delegación Coyoacán,
Ciudad de México, México
Teléfono: +52 (656) 6884 846
obianez@uacj.mx

Haga clic aquí para escribir al autor

• ISSN 2007-2422

Revisión histórica de las sequías en México: de la explicación divina a la incorporación de la ciencia

• Judith Domínguez •
El Colegio de México
* Autor para correspondencia

Resumen

Domínguez, J. (septiembre-octubre, 2016). Revisión histórica de las sequías en México: de la explicación divina a la incorporación de la ciencia. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(5), 77-93.

El artículo presenta las diversas representaciones sociales sobre la sequía que se han documentado en México a partir de una revisión histórica, documental y hemerográfica. Desde la perspectiva social, analiza los episodios de sequía por los que ha pasado el país; esto es de interés pues tienen consecuencias económicas y producen efectos negativos en la población. Las primeras explicaciones fueron religiosas ante sucesos que rebasaban la comprensión cotidiana, atribuyéndolos a fuerzas divinas; de manera paulatina, la generación de conocimiento e información llevó a explicaciones científicas con base en la observación y análisis. Para la nación es imperativa una política específica basada en principios preventivos, no sólo por posición geográfica, sino por las condiciones de estrés hídrico que tienen las regiones donde hay mayores efectos por la sequía, y que ya se conocen, al ser un fenómeno cíclico que, sin embargo, puede verse alterado por la variabilidad climática.

Palabras clave: sequía, información, políticas públicas del agua.

Abstract

Domínguez, J. (September-October, 2016). Historical Review of Droughts in Mexico: From the Divine Explanation to the Incorporation of Science. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 7(5), 77-93.*

The article presents the various social representations on the drought that have been documented in Mexico from a historical, documentary and hemerographic review. From a social perspective, it analyzes episodes of drought in the country. This review is of interest because it had economic consequences and negative effects in the population. The first explanations to events were religious, that went beyond the everyday understanding, attributing to divine forces the lack of water; gradually, knowledge and information led to scientific explanations based on observation and analysis. In Mexico, it is imperative a specific policy based in preventive principles, not only by geographical location, because the drought is a cyclical phenomenon, however, It may be altered by climate variability.

***Keywords**: Drought, information, public water policies.*

Recibido: 07/08/2015
Aceptado: 08/02/2016

Introducción

Dice una famosa cita, atribuida a muchos grandes pensadores clásicos, que el pueblo que no conoce su historia está condenado a repetirla; máxima que aplicaría al análisis de un tema como la sequía. En la revisión que se realizó para este artículo se encuentran muchas historias sobre las sequías, que a pesar de los siglos que han pasado desde que se produjeron, se repiten, quizá no con la misma dimensión, pero cuya respuesta social o gubernamental fue similar. Atribución divina o al menos sin explicación ante situaciones despreve-nidas; crisis agrícolas; medidas gubernamentales de subsidio para responder a una emergencia; disposiciones que agravan otras facetas del agua, como la sobreexplotación de acuíferos, y que sin embargo se siguen repitiendo. Hoy en día, tenemos en favor mayor conocimiento científico sobre el tema, pero la sequía sigue dentro de un escenario de incertidumbre, con agentes sociales que pueden diluir la dimensión del problema. La variabilidad climática que ha experimentado el planeta a lo largo de los siglos se ha incremen-tado, pero también vemos que el hombre se ha adaptado, con diversas acciones, como migracio-

nes, intercambios o cooperación, o a través de decisiones paliativas u organizativas. Asimismo, se está generando mayor conocimiento técnico y científico en torno al fenómeno, para pasar de datos probabilísticos a la generación de escenarios. Si creemos que sólo el gobierno debe o puede responder por sí solo a las crisis derivadas de una sequía es un error; son las instituciones, y entre ellas las sociales, las llamadas a jugar un papel activo en la adaptación a estos fenómenos, que requieren de información y conocimiento, y que ahora se pretende incorporar desde los programas para atender la sequía.

En este recorrido histórico se encuentra la organización social de agricultores con planes de emergencia para lidiar con fenómenos hidrometeorológicos extremos; el apoyo de actores sociales, como la Iglesia (en su época), con un rol activo para socorrer a la población desfavorecida, o un papel preponderante de ayuntamientos, como autoridades encargadas de los problemas de la ciudad, entre ellos migraciones consecuencia de las sequías; en el campo hay también una incipiente llamada al cambio tecnológico y de cultivos para épocas de escasez de agua. ¿Cuántas acciones de éstas existen en los programas actuales de lucha contra la sequía?

Tal como se explica ahora, ¿es un problema técnico y científico exclusivamente? ¿Tiene un componente social que recae en gran medida en las acciones que puedan desarrollar los diversos actores sociales? ¿Qué están haciendo al respecto? Estos son cuestionamientos que surgen de la lectura histórica de la sequía, que más que anecdótica, lleva a pensar: ¿Cómo afrontar desde la sociedad las sequías extremas que se pronostican para el país en un futuro cercano? Sin pretender resolver o dar respuestas, se exponen diversas referencias a la forma en que se ha visto la sequía en México y algunas de las principales preocupaciones, consecuencias y efectos visibles en diversas épocas.

La segunda cuestión que subyace a este artículo es situar los fenómenos recientes de grave escasez de agua, en el norte del país principalmente, e identificar la percepción social en torno a las últimas sequías, que —aún se cree— ocurrieron de manera desprevenida —al menos así se lee en diversos documentos hemerográficos— y de observar las medidas reactivas que se adoptaron cuando ya estaba ocurriendo. De forma paradójica, estaba documentada toda una historia de las sequías por las que ha pasado el país, en que por su propia ubicación geográfica no representan un fenómeno anormal o atípico, sino más bien cíclico o periódico. Las sequías que se han presentado en el norte parecieran estar relacionadas inversamente con la ocurrencia de lluvia en el sur del país, como han documentado algunos meteorólogos (Méndez & Magaña, 2010: 1179).

¿Fue la última sequía un fenómeno atípico que no permitió prever su magnitud, y adoptar acciones sociales y gubernamentales? Seguramente desde el punto de vista técnico hubo datos, pero para que un problema sea público hay que socializar dicha información, y para que se incorpore en la agenda pública (es decir, se convierta en un tema de política pública) hay que mostrarla y convencer a quien toma decisiones. Desde el punto de vista social, un problema lo es cuando en lo social así se ha construido (Berger & Luckmann, 2003: 162 y ss.) y quizá este elemento está faltando en las acciones gubernamentales que se han adoptado para atender las últimas sequías. Es innegable que ha habido más presupuesto destinado a atender las emergencias —tránsito de una política reactiva hacia una preventiva— y mejor organización burocrática y administrativa para atenderla; sin embargo, podrían cuestionarse las lecciones aprendidas por cuanto a la incorporación de la sociedad en la construcción del problema.

Objetivo de la investigación, metodología y alcances

El objetivo de este artículo es mostrar la evolución histórica en torno a las sequías, que se recopiló por historiadores, y a partir de esta revisión analizar las últimas sequías desde una dimensión social; es decir, con base en el análisis de sus consecuencias sociales, y la conformación de las acciones y programas para atenderlas,

• ISSN 2007-2422

donde se muestran los elementos técnicos, sociales o científicos que se toman en cuenta para su conformación.

La metodología usada para este artículo fue la revisión bibliográfica (para la época prehispánica, colonial, independiente, revolucionaria y siglo XX), hemerográfica y documental, para dar cuenta de la última sequía registrada (siglo XXI). Contreras-Servín (2005: 120) señala que existen también registros periódicos de las estaciones meteorológicas para el siglo XIX, aunque han sido una fuente olvidada.

Se revisaron los textos de los principales historiadores sobre sequía y crisis agrícolas, así como —en menor medida— algunos textos provenientes del campo de la ingeniería; estos últimos para la segunda mitad del siglo XX, periodo durante el cual se produjeron estudios técnicos para medir las lluvias y calcular el agua en las presas ante los efectos de las sequías, en donde prevalecen los elementos técnicos sobre los anecdóticos que encontramos en los siglos pasados, a partir de los cuales se reconstruyó la historia de las sequías. La información constituye ya un elemento para tomar decisiones, y se genera cada vez más para prever las consecuencias en la agricultura o sus impactos sociales.

Para ejemplificar las diferentes visiones y preocupaciones en torno a los efectos sociales y económicos de las sequías (principal interés de los siglos pasados) se retoman citas de los historiadores Florescano (2000) y Escobar-Ohmstede *et al*. (2003), principalmente, y a partir de la periodización que hacen para su análisis se recogen en este artículo diversas concepciones y preocupaciones, siguiendo en términos generales su sistematización en la época prehispánica, colonial, independiente, revolucionaria y siglo XX, remitiendo al lector a sus obras para conocer en detalle lo que ellos reportan. En este artículo se sintetizan citas para mostrar la percepción social, que pasa por una construcción social (Berger & Luckmann, 2003) y cultural, tal y como exponen Antón y Díaz-Delgado (2000) de las sequías que vivió el país.

Para la etapa actual, referida a la última sequía, se retoman documentos gubernamentales, presentaciones de autoridades y datos hemerográficos que, paradójicamente a la grave situación derivada por una de las más grandes sequías de la historia del país, apenas y es reportada en los periódicos nacionales. La prensa, en épocas pasadas, fue una fuente importante; sin embargo, en México, la última sequía apenas y se colocó en la mirada pública de los grandes diarios nacionales.

Esta revisión histórica se expone desde una perspectiva de las ciencias sociales, sin abordar los temas técnicos o científicos del fenómeno, lo que representa una visión parcial, si se quiere ver así, del problema que se aborda.

Las diversas conceptualizaciones sobre la sequía a través de los siglos y las disciplinas

Abordar el tema de las sequías desde la perspectiva social e histórica implica referirse en particular a las consecuencias sociales y económicas que tuvieron estos episodios en la población. De la revisión de la literatura sobre la historia de las sequías de las que dan cuenta importantes historiadores, como Enrique Florescano (2000) y Antonio Escobar Ohmstede (2004), se encuentran diversas conceptualizaciones de la sequía, dependiendo de la época histórica en que se registró, de la ubicación geográfica o de una conceptualización cultural prevaleciente. Si bien en todas se refiere a la ausencia de humedad, también se advierte que esta definición se fue completando a través de los siglos para llegar ahora a una definición con un contenido más técnico.

Dependiendo de la disciplina (social, técnica o científica) se destacan determinados factores para referirse a la sequía. Para Florescano (2000): "una definición tentativa de sequía es la ausencia de humedad, especialmente por falta de lluvia", pero inmediatamente repara en que es insuficiente, y considera más adecuado: "hablar no sólo de escasez de agua, sino su carencia casi total, y contingente, que durante un lapso afecta las condiciones de desarrollo de plantas y animales", y continúa diciendo que: "la sequía nos

ISSN 2007-2422

preocupa, sobre todo, porque afecta la vida de los seres humanos, destruye sus fuentes básicas de alimentación y provoca desórdenes en su vida social y política". Esta conceptualización se refiere evidentemente a una construcción social de la sequía; es importante porque considera los efectos en los seres humanos y su cotidianidad.

En épocas pasadas podía referirse de manera expresa a la sequía o llamarse de otra manera, pero en esos casos se identifican graves efectos socioeconómicos e inclusive políticos, pues periodos de severas sequías coincidieron con grandes conflictos sociales del país. En este recuento histórico encontramos la referencia a sequía, seca, canícula o sequía intraestival, escasez de lluvia, y con ello se reportan, al menos eso parece, sequías. Los historiadores se han encargado de periodizarlas y de establecer aquellas más importantes para México, trascendiendo la falta de lluvias. Dependiendo del concepto que se adopte, una sequía podía abarcar más estados en determinada época, como la sequía intraestival.

Escobar-Ohmstede *et al*. (2003, 2004) destacan que para las ciencias sociales, refiriéndose a los historiadores, es importante su análisis, no por el fenómeno en sí, sino por los efectos sociales, económicos y políticos, y por las respuestas sociales que surgen ante ella, como estrategias y medidas paliativas para disminuir sus impactos negativos (Escobar-Ohmstede *et al*., 2004: 23). Interesa, por tanto, el análisis de la sequía en la población y sus actividades. La agricultura fue por mucho tiempo la labor más afectada (¿sigue siéndolo?), en concreto la del maíz, aunque luego se extendió a otros cultivos, como algodón, que representó una etapa de prosperidad para muchos estados del norte y, en menor medida, frijol y trigo. Hoy en día se reporta además la muerte de ganado, pues a través de los fondos gubernamentales de desastres se cubren las pérdidas a los ganaderos.

Una de las tesis que maneja Florescano (2000) es que la sequía fue un factor relevante, a veces directo, de conflictos políticos importantes de la historia nacional, como la Independencia y Revolución, pues coinciden movimientos sociales en épocas en que se atravesaba por una sequía.

La documentación de diversas sequías ha servido para analizarlas por periodos y en cada época hubo una especial preocupación ligada con la situación socioeconómica, cultural y de conocimiento que se tenía en ese momento. Asimismo, en algunas ocasiones se ha contextualizado el análisis dentro de las variaciones climáticas mundiales para concluir que aquellas grandes sequías o episodios de desastres que se vivieron en el mundo coinciden con las grandes sequías que atravesó México. Entre los siglos XVII y XIX, las consecuencias sociales que derivaban de las sequías eran mortandad, migración, violencia y aumento de criminalidad, de tal manera que un fenómeno natural podía resultar en problemas políticos, económicos y sociales.

En el siglo XXI, la conceptualización es diferente, tiene un planteamiento predominantemente científico, técnico y ligado con el cambio climático (Semarnat-INE, 2009). En la segunda mitad del siglo pasado, la información disponible muestra que el análisis fue hecho en particular por ingenieros y con una preocupación asociada con el almacenamiento de agua en las presas. Hoy en día se incorporan meteorólogos y científicos de diversas disciplinas, a fin de recrear escenarios para la toma de decisiones y ya se efectúa una distinción más precisa entre periodos de escasez de agua atribuibles a factores exógenos a la variabilidad climática y sequía.

La sequía es un fenómeno climático que acontece con cierta periodicidad. En México se ha presentado de forma cíclica y ha seguido un patrón en los últimos años relacionado con los fenómenos de El Niño (Méndez & Magaña, 2010). Desde tiempos remotos, la población se ha adaptado a las condiciones climáticas en los lugares en que se ha asentado, incluso en aquellos caracterizados por la escasez o inexistencia de agua, en otras ocasiones ha migrado hacia sitios con presencia de agua. Las grandes civilizaciones se asentaron, por lo general, al margen de ríos, lo que favoreció su esplendor. No obstante, otras supieron adaptarse a sus condiciones y convivir con ausencia de agua. El problema actual es que las sequías ya no

• ISSN 2007-2422

son sólo un fenómeno climático o, si lo son, se agravan también por factores relacionados con la actividad humana. De forma muy reciente se ha reconocido que el cambio climático o variabilidad climática se ha acelerado en la segunda parte del siglo pasado, siendo atribuible a actividades humanas (IPCC, 2014: 2), las cuales han provocado mayor desertificación en los suelos y, en cuanto al clima, una mayor variabilidad (¿más extrema?), que se produce hoy día, además, en escenarios de incertidumbre. Por otro lado, existe mayor conocimiento científico, herramientas y metodología para conocer de modo anticipado las variaciones climáticas, y de ser proporcionadas y utilizadas a tiempo, pueden reducir los impactos adversos de estas variaciones, predecir comportamientos y consecuencias, para tomar decisiones anticipadas. Este planteamiento subyace a la política actual de atención a los fenómenos de sequía.

Se distinguen diversos tipos de sequía: **meteorológica, hidrológica** o **agrícola**; pero interesa aquí referirse a los conceptos más recientes, como la **sequía socioeconómica**, la cual tiene que ver con la disminución de disponibilidad de agua hasta el grado de producir daños económicos y personales a la población de la zona afectada por la escasez de lluvias, en especial en cuanto al abastecimiento de provisiones y servicios, como agua, pasto o energía eléctrica (Coronel, 2013). La presión antropogénica sobre el recurso agua hace que cada vez sea mayor la incidencia de la sequía socioeconómica, con pérdidas económicas crecientes, incluso en el caso de una sequía meteorológica leve (Ortega-Gaucin & Velasco, 2013).

Desde el punto de vista cultural, la sequía "se refiere a la percepción que una sociedad puede tener acerca de la ausencia o escasez de precipitaciones en un momento determinado" (Antón & Díaz-Delgado, 2000: 54). Para confirmar esta conceptualización, se pone como ejemplo que en algunas regiones de África se piensa que hay sequía cuando deja de llover 5 o 6 años; pero en diversos países de Europa, la ausencia de lluvia por un mes ya se considera sequía. La evolución conceptual e inclusión de criterios técnicos para su análisis han permitido acercarse a un concepto más unánime, respaldado por datos técnicos. La intención de referirse de manera explícita a estas dos últimas es porque las otras conceptualizaciones son reconocidas y aceptadas por los expertos en este tema; sin embargo, las dos últimas destacan aspectos relacionados con el rol de la sociedad en la atención de los problemas que derivan de un periodo de sequía, desde la aceptación como tal hasta la adopción de medidas paliativas. Más adelante se expondrá cómo se pretende incorporar esta dimensión en los programas contra la sequía que se elaboran en la actualidad.

Un recuento histórico de las sequías: ¿qué se registraba?

En los siguientes apartados se mostrará, con algunas referencias y citas, la preocupación principal, medidas y efectos en torno a estos eventos climáticos.

Época prehispánica: sacrificios al dios de la lluvia

La información respecto a las sequías que se vivieron en la época prehispánica es escasa, más bien anecdótica. No obstante, se encuentran registros de episodios severos que tuvieron impactos catastróficos en las civilizaciones antiguas, asociados con el clima. La ocurrencia, extensión y características de las sequías antes de la llegada de los españoles es difícil de conocer por la falta de información (Conagua, 2014b), sin embargo, los historiadores han hecho una reconstrucción con base en la recopilación o mención en diversos documentos, principalmente registros, de iglesias, municipios, textos particulares de hacendados o de otras autoridades, por ejemplo, ante acuerdos internacionales.

En México, olmecas, mayas, nahuas y tarascos realizaban prácticas agrícolas dependiendo de la región, clima y recursos con que contaban. Ante la falta de lluvia se llevaban a cabo sacrificios para contentar a los dioses. Tras la dominación española, dichas prácticas fueron

ISSN 2007-2422

abatidas y sustituidas por una nueva organización agrícola y de propiedad de la tierra. La difusión progresiva de plantas y animales europeos fueron transformando el uso y explotación del suelo, introduciéndose especies que no existían antes. Entre 1000 y 1500, "Fuentes indígenas y crónicas antiguas señalan que en esos años en que 'llovía fuego', o no había suficiente precipitación pluvial, se perdían las cosechas de maíz, bajaba el nivel de la laguna, las chinampas quedaban encalladas en la tierra y los cultivos y cosechas se reducían. Cuando la sequía se prolongaba por dos o más años, no había simiente para siembras y estos efectos se aumentaban y multiplicaban. La pérdida parcial o total de las cosechas producía escasez, agotamiento de las reservas acumuladas en los graneros familiares y estatales, y, en los casos más graves, hambre." (Florescano, 1980; Conagua, 2014b; García-Acosta, 1993).

Algunos estudios incluso relacionan las caídas de grandes culturas con haber sufrido sequías prolongadas. Se considera a las sequías incluso como la causa principal de que comunidades y culturas prehispánicas desaparecieran por falta de agua en distintos momentos. Diversas fuentes bibliográficas permiten cuantificar entre 74 y 88 eventos de sequía en el país durante ese periodo. Cerano-Paredes, Villanueva-Díaz, Valdez-Cepeda, Méndez-González y Constante-García (2011) reconstruyen los datos de la sequía a mediados del siglo XV (1438-1460) llamada para el centro de México como "megasequía", que provocó pérdidas de cosechas, así como hambre y mortandad. La sequía apareció sin duda como un factor que impulsó la migración de los pueblos prehispánicos (Sánchez-Mora, 1980: 75-76).

Época colonial: el municipio como responsable de atender las sequías, la religiosidad para su terminación y la atención en los efectos agrícolas

Durante la época colonial se sabe de prolongadas sequías en el Bajío y Coahuila, que llegaban a durar entre 5 y 7 años. Los alimentos escaseaban y, por tanto, subía su precio. La falta de alimentos fue causa de epidemias y hambre entre la población, y de aumento de mendigos y desempleados en las principales ciudades de la Nueva España (Conagua, 2014b).

La primera mitad del siglo XIX estuvo marcada por eventos catastróficos de toda índole, desde epidemias, plagas y enfermedades hasta la sequía, con las consecuencias de migración, conflictos sociales, acaparamiento, desigualdad social e inestabilidad política en muchos casos. En ese tiempo se pasa de una economía de subsistencia —que caracterizó la época pasada— a una mercantilista, a partir de las haciendas, latifundios y ranchos de propiedad privada. La base de la economía era la agricultura. La sequía tuvo grandes consecuencias en el ganado y la producción agrícola (Contreras-Servín, 2005: 118-133).

Durante la época colonial y hasta mediados del siglo XIX se observaron patrones similares tanto en los efectos como en las acciones para atenuar las sequías (Escobar-Ohmstede, 1997; García-Acosta, 1993).

Las medidas para enfrentar los efectos de las sequías podían distinguirse entre paliativas y de largo plazo. Entre las primeras es posible identificar el restablecimiento de los depósitos de almacenes de semillas, control de las existencias, exención de impuesto, ejecución de mejoras técnicas a la producción, importación de granos de unos estados a otros, incluso desde Estados Unidos, o conformación de juntas de beneficencia. Por otro lado, entre las medidas de corto plazo tenía evitar la tala desmesurada de bosques, a través de leyes y ordenanzas sobre la tala de árboles, incendio de montes y perjuicios a los manantiales. Este hecho pareciera disociado de las sequías, sin embargo resulta necesario reconocer que los bosques son ecosistemas que moderan los cambios de temperatura, protegen el suelo contra la erosión eólica e hídrica, y aseguran la cantidad y calidad del agua. García-Acosta (1993: 14) señala que las medidas tomadas por las autoridades en general estuvieron encaminadas a paliar la escasez y carestía de los alimentos básicos de la

• ISSN 2007-2422

población: básicamente de maíz, frijol y trigo; no se identificaron medidas de tipo preventivo.

Una sequía en particular se ha caracterizado como la más grave del periodo colonial: la ocurrida entre 1785 y 1786, que abarcó casi todo el territorio novohispano. Fue la más severa crisis agrícola experimentada por los pobladores de la Nueva España. A partir de ella se desató una espiral inflacionaria que duraría 20 años. Los problemas económicos que afectaron algunas regiones, en particular el Bajío, aunados a los descontentos sociales y a los problemas políticos que existían en la Nueva España y en la metrópoli pueden considerarse parte de los factores detonantes en el estallido de la Guerra de Independencia en los primeros años del siglo XIX (Conagua, 2014b).

Durante las crisis más severas, las ciudades recibían oleadas de migrantes y vagabundos, y la tensión social aumentaba por el asedio de estas multitudes a las alhóndigas, los pósitos, las instituciones de caridad y los graneros de los grandes propietarios. En repetidas ocasiones, ante el temor que despertaba la presencia de mendigos, las autoridades municipales y los virreyes acordaban implantar bajas importantes en el precio del maíz, o aumentos en las limosnas y en los servicios asistenciales.

En particular, en la crisis de 1785-1786 se llegaron a poner en práctica programas para combatir la mendicidad y el desempleo; se aprobaron programas de obras públicas dirigidos a dar ocupación a esas multitudes amenazantes y a proporcionarles un salario que les permitiera adquirir alimentos (Conagua, 2014b). Sin embargo, la mayoría de las veces, éstas y otras medidas no lograban frenar la cantidad de efectos sociales que se desencadenaban. Junto con la carestía y el hambre venían epidemias y enfermedades que se combinaban con la ingesta de malos alimentos, provocando estragos entre la población más pobre.

La preocupación principal por sequías, secas o falta de lluvias era la escasez de granos, principalmente maíz, y en algunos casos se hacía referencia al frijol. En esa época hay muchas anécdotas de la acumulación y concentración de granos por los hacendados, que encarecía su compraventa y provocaba malestar social. La sequía estuvo asociada con la crisis agrícola en particular, base de la economía. Las principales referencias son al centro y norte del país, aunque también se documentan en la península de Yucatán y en la región montañosa de Veracruz. La autoridad encargada de resolver y atender estos problemas fueron los ayuntamientos. La Iglesia desempeñó un rol importante en la atención de sequías, especialmente con la población, pues se expidieron varias órdenes para repartir granos o venderlos a un precio muy bajo, a fin de paliar efectos en los sectores pobres.

Época independiente: los efectos en el desarrollo agropecuario y apoyos de Estados Unidos

Las referencias a esta época muestran los efectos socioeconómicos más importantes de las sequías, como la pérdida de ganado y siembras, y para fines de siglo, abusos por parte de hacendados, latifundistas y grandes compañías. Asimismo, se observa una buena relación con Estados Unidos, país que apoyó a México en épocas de crisis agrícola, con donación de granos para superar las pérdidas en el norte del país. En esta etapa también es referencia obligada el rol de la Iglesia, que muestra el poder que ejercía y desplegaba en épocas como éstas, para ayudar o eximir de diezmos. Al respecto, hay varias referencias a ciudades como Guanajuato o Monterrey, así como vínculo con los gobiernos para atender sequías incluso de forma no terrenal, a través de rogativas a la Virgen de Los Remedios o a la patrona de la ciudad, tradición que venía de la Colonia. Muy documentado está el norte del país, por razones obvias, aunque también se encuentran referencias a regiones como Veracruz (Escobar-Ohmstede *et al*., 2004: 239).

Las pérdidas de ganado son cuantiosas. Así, existe una referencia de 1828, un episodio en San Luis Potosí, para referirse a la escasez de lluvias, en que se registró una pérdida de 199 538 cabezas de distintos tipos de ganado

ISSN 2007-2422

(Escobar-Ohmstede *et al*., 2004: 55) en Sinaloa, donde se conjuntaron en 1857 heladas y sequías, calculándose una pérdida de 500 animales diarios en cinco meses ese año (Escobar-Ohmstede *et al*., 2004: 83). Los años más críticos para el ganado fueron las sequías de 1875, 1884, 1886 y 1894 (Florescano, 2000). Se documentó la especulación que se producían en bienes elementales, no sólo los granos, sino de agua. Así, en Ciudad Juárez, donde la compañía El Paso Ice and Refrigerator vendía el agua de noria a cinco centavos por galón, llegó a costar 1.50 pesos una barrica (Escobar-Ohmstede *et al*., 2004: 188).

Persiste la referencia a la extrema religiosidad para resolver los problemas de sequía y tener solución gracias a la intervención de un poder divino. Esto se observa en estados como San Luis Potosí, Nuevo León o Guanajuato, donde inclusive el gobernador participaba de las procesiones por las calles de la ciudad para pedir que cesara la sequía (Retta, 1989: 62, en Escobar-Ohmstede *et al*., 2004: 51); se documentan algunos actos religiosos, en que a su conclusión, iniciaba la lluvia (Escobar-Ohmstede *et al*., 2004: 84).

Para fines del siglo XIX, las consecuencias de la sequía llevaron a la preocupación del vecino país del norte, previéndose la remesa que se requeriría para estados del norte de México (Escobar-Ohmstede *et al*., 2004: 207). Pero también se documenta la adopción de medidas legislativas para su atención. El Senado permitió la libre importación de cereales y animales en pie desde Estados Unidos, a fin de ayudar a las clases más necesitadas (Galván, 1951: 374, cit. por Escobar-Ohmstede *et al*., 2004: 209). La época está marcada por actos de solidaridad ante situaciones extraordinarias como la sequía, en especial a nivel gubernamental y religioso; no obstante, cuando hay alguna referencia a empresas no es tan evidente, dando razones 'justificativas' o reaccionando con medidas especulativas, tal como sucedió en Zacatecas, en que por ejemplo, la Compañía Limitada del Ferrocarril Central Mexicano respondía que no era posible proveer del agua que se le solicitó para la ciudad (AHZ, Jefatura Política, correspondencia general, c. 41, cit. por Escobar-Ohmstede *et al*., 2004: 211). Se documentó también el riesgo económico que representó para algunas compañías la falta de agua (Padilla, 1980: 113, cit. por Escobar-Ohmstede *et al*., 2004: 238).

Los efectos de la sequía en las ciudades se traducían principalmente en la migración de la población, lo que incrementaba pobreza y enfermedades, resultado del trayecto que recorrían las personas para llegar a la urbe, alimentándose de forma poco higiénica; esto, como consecuencia indirecta, provoca más enfermedades en tiempo de sequías, paralizando el comercio y llenando las ciudades de mendigos; también se cierran algunas fábricas (CPD, 1.17, C.24, 0011892).

En ese periodo también se referencia el cambio tecnológico vislumbrado como necesario para estar prevenidos ante la sequía de 1893, sugiriendo cambio de cultivos y medidas preventivas, como la guarda de forraje para el invierno, y agricultura bien aplicada y organizada (Escobar-Ohmstede *et al*., 2004: 222).

Durante el Porfiriato (1876-19l0), aunque el área de cultivos irrigados aumentó a 700 mil hectáreas y mejoraron de forma notable el transporte y la comunicación por ferrocarril, la irrupción de las sequías continuó provocando carestía, hambre, migraciones, inestabilidad social y mayores compras de cereales en el extranjero. Para Florescano (2000) hubo una relación estrecha con el estallido de la Revolución y la sequía de tres años que afectó a los estados de Querétaro, Hidalgo, Chihuahua y Nuevo León, donde se gestó la Revolución. La sequía no sólo afectó a los cultivos de subsistencia tradicional sino también a los cultivos comerciales, como algodón y cebada (Florescano, Sancho y Cervera, & Pérez-Gavilán, 1980: 749).

La sistematización y análisis de algunas sequías regionales

Si bien la región norte de México ha sido la más propensa a sequías prolongadas, se documentaron otras zonas. García-Acosta (1993) presenta una regionalización histórica de las sequías, en

• ISSN 2007-2422

la cual realiza un cuadro comparativo a partir de la presencia de este fenómeno en la región norte, sur y centro (ver cuadro 1). En la época prehispánica, el total de sequías era en las regiones centro y norte de México; mientras que entre 1521 y 1900, aun cuando hubo presencia de sequías en el sur, la mayor parte de ellas se presentó en el norte y centro del país.

En particular, para el Valle de México, un estudio de Sánchez-Mora (1980) muestra que entre 1500 a. C. y 1514 tuvieron lugar 12 sequías; mientras que otro análisis realizado por Garza-Merodio (2002 y 2007), a partir de actas de los cabildos civil y eclesiástico, da cuenta del comportamiento de sequías entre 1600 y 1870 para la cuenca de la ciudad de México. Los resultados muestran que esta ciudad presenció para dicho periodo un total de 23 sequías, cuya duración varía entre 1 y 6 años.

La zona del Bajío fue intensa y frecuentemente afectada en la década iniciada en 1690, pues se tienen registros de seis años consecutivos de sequía (1691-1696) (Sosa-Nájera, Lozano-García, Priyadarsi, Roy, & Caballero, 2010: 437-451). La península de Yucatán padeció el fenómeno (1725-1727) y lo mismo el estado de Coahuila (1775-1777, 1798-1802, 1805-1810). Por su extensión e intensidad, las sequías más desastrosas fueron las que afectaron las zonas de cereales: Valle de México, Puebla, Tlaxcala, Bajío, occidente y norte del país, las cuales se presentaron en 1624, 1692, 1740, 1750, 1785 y 1807-1810, y dieron lugar a graves impactos. En 1749 y 1785 las afectaciones se incrementaron por la presencia simultánea de heladas (Conagua, 2014b).

La intensa sequía en Mesoamérica a principios del siglo XVI (principios de la era colonial), precedida por la llegada de Hernán Cortés y que se extendió por 26 años (1514-1539), interactuó con epidemias y favoreció la catastrófica mortandad de la población mexica a consecuencia de la conquista (Acuña-Soto, Stahle, Cleaveland, & Therrell, 2002; Stahle *et al*., 2011).

De acuerdo con Florescano (1980), Díaz *et al*. (2002), y Endfield y Fernández-Tejeda (2006), las sequías más devastadoras fueron aquellas que afectaron el centro y norte de México, en especial las que ocurrieron de forma simultánea con la presencia de heladas, como fue el caso de los años 1624, 1740, 1785, 1808 y 1810.

Cabe señalar que la relación entre sequía y carencia de alimentos no es directa, han existido otros factores que han afectado la carencia de alimento; por ejemplo, el maíz escaseaba en el Estado de México en 1888, pero abundaba y era barato en Durango, Guerrero, Hidalgo, Veracruz, Jalisco y San Luis Potosí, sin embargo, el costo de flete en ferrocarril era bastante elevado (Escobar-Ohmstede, 1997).

Por lo general, las sequías afectan a los estados del norte de México; sin embargo, este fenómeno también ha estado presente históricamente en otras partes del territorio nacional.

Cuadro 1. Regionalización histórica de las sequías.

Región	Periodo		
	Prehispánico (%)	1521- 1821 (%)	1821- 1900 (%)
Centro	93	48	27
Centro-norte	7	6	29
		12	23
Total	**100**	86	79
Centro-sur	-	5	14
Sur	-	7	5
Total		12	19

Fuente: García-Acosta (1993: 18).

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 77-93
ISSN 2007-2422

Cuadro 2. Sequías regionales y sus consecuencias en el siglo XIX.

Aguascalientes, Chiapas, Durango, Guanajuato, Morelos, Nuevo León, Coahuila, Oaxaca, San Luis Potosí y Veracruz	Durante la década de 1860, diversos estados comunicaron que en distintas partes de sus territorios la escasez de lluvia derivó en carestía de semillas
San Luis Potosí	Entre 1867 y 1869 las sequías meteorológicas parecían cotidianas, al grado de tener un conocimiento empírico sobre los periodos en que podían esperar buenas, regulares y malas cosechas
Coahuila Chihuahua, Durango, Sinaloa, Sonora, Yucatán	En la década de 1870 serios problemas de sequía afectaron la cosecha de alimentos
Sinaloa y Chihuahua	En 1878, la mayoría de los estados del norte sufrió una sequía que provocó gran escasez y carestía de alimentos. En Sinaloa, esta grave situación obligó a importar semillas de Estados Unidos, mientras que Sonora se abasteció de semillas de Jalisco. Durante la década de 1880, las sequías afectaron a 23 estados de la república, sin embargo no fueron extremas, pues pudo recuperarse parte de las cosechas
Campeche y Yucatán	La carencia de lluvias en 1882 provocó pérdida de cosechas
Chihuahua y Tamaulipas	En la década de 1890, la escasez de lluvia había ocasionado un deceso de 125 mil animales
Coahuila	Entre los años 1979 y 1988 el estado de Coahuila sufrió 10 años de sequías. En número de años de ocurrencia le siguieron Guanajuato (10), Durango (9) y Zacatecas (9)

Fuente: Escobar-Ohmstede, 1997; Cerano *et al*., 2011.

García-Acosta (1993) realiza un recuento histórico de los efectos sociales que han ocasionado las sequías entre los siglos XVI y XIX, señalando que si bien las sequías se han identificado en todo del país, éstas han sido particularmente severas al norte (que es donde se tienen áreas desérticas con algunas zonas verdes) y en la zona centro-norte.

Las sequías del siglo XX: elaboración de planes para paliar sus consecuencias

En el siglo pasado, en particular en la segunda mitad, ya se aborda de forma programática la sequía, estableciéndose planes o programas gubernamentales para atenderlos, es la etapa de las grandes presas en México, para que el agua fuera el motor de desarrollo de una economía agrícola. Es un momento, en opinión de Florescano (2000), que presenta problemas de interpretación, que surgeN en las propias fuentes que la reseñan. Esto muestra que las siete sequías en el periodo de 1930 a 1977 fueron extremadamente severas, refiriéndose a las padecidas en 1925, 1935, 1957, 1960, 1962, 1969 y 1977 (Sancho y Cervera, Marengo-Mogollón, Escalante-Mar, & Padilla-Ríos, 1977).

Aboites-Aguilar (2013: 95, 226, 285) expone la importancia del agua para el cultivo algodonero en el norte del país, y se vislumbra también el comienzo de la sobreexplotación de los acuíferos subterráneos, promovido, en sus palabras, por los funcionarios y la propia política de aguas de ese entonces en la Comarca Lagunera, para paliar los efectos de la sequía; pero también se refiere a otras áreas, como Mexicali, en donde los empresarios urgían al presidente Adolfo Ruiz Cortines a perforar pozos profundos durante la seca etapa de 1950; ello, a cargo del erario federal, siendo esta década la "más intensa y dramática" para el cultivo algodonero; destaca el papel del Banco de México ante situaciones

de sequías y del propio gobierno (Secretaría de Hacienda y Secretaría de Recursos Hidráulicos), que elaboraron planes de subsidio y algunos estudios ante el desinterés de bancos privados por otorgar créditos.

Las grandes ciudades, como Gómez Palacios, no habían podido sustraerse a los efectos de la sequía, por más industrializadas que estuvieran (Aboites-Aguilar, 2013: 340). Los algodoneros se organizaron para hacer frente a la sequía, entre otros problemas que les preocupaban, formando comités de emergencia para atender los siguientes ciclos agrícolas "y contrataron matachines para elevar plegarias a san Isidro Labrador para que lloviera". En 1958 terminó la década seca y, por el contrario, hubo lluvias intensas, que provocaron inundaciones a causa de los desbordamientos de ríos como el Lerma, Bravo o Pánuco, y entonces, con tanta humedad "las semillas brotaban dentro del capullo", provocando también grandes pérdidas.

Entre 1910 y 1977 se tiene el registro de 38 sequías (20 catalogadas como severas y siete extremadamente severas), de las cuales 17 se encuentran relacionadas de forma directa con sequías mundiales, como la de 1951, que afectó Oceanía, Europa y Asia; la de 1956, que impactó a Europa, Asia y América; o la de 1972, con efectos en Oceanía, Asia y América (Conagua, 2014b).

La sequía de 1949 perjudicó sobre todo la región centro-norte del territorio nacional, alargándose hasta 1958 (Aboites-Aguilar & Camacho-Pichardo, 1996). Asimismo, una de las sequías más devastadoras para la agricultura es la de 1962, en los estados de Tamaulipas, Durango, Nuevo León, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nayarit, Sinaloa y Baja California (Conagua, 2014b; Endfield & Fernández-Tejeda, 2006).

Las sequías de 1960, 1962 y 1969 provocaron una crisis en la agricultura y transmitieron sus efectos a la economía y la sociedad. Algunas de las sequías más costosas de la época se desarrollaron entre 1947 y 1948, lapso en el que murió 50% del ganado en Chihuahua. Derivado de los efectos de estas sequías, el gobierno federal importó grandes cantidades de cereales y alimentos para atender de inmediato las zonas de desastre y, en el caso de las más severas, amplió los créditos y plazos de pago a los agricultores más perjudicados; por su parte, tanto el gobierno federal como los estatales adoptaron medidas de corto y mediano plazos para disminuir los efectos, como construir presas, bordos y aguajes, e incrementaron los sistemas de dotación de agua a pueblos y ejidos. Es así que se crea en 1969 el Plan de Lucha contra las Sequías, a fin de proporcionar trabajo a los desempleados en las zonas de desastre (Florescano *et al*., 1980: 750) y en particular, la Secretaría de Agricultura y Ganadería pidió préstamo a los bancos para ampliar los plazos de cobertura de los cultivos, como parte de la implantación del Programa Nacional Agropecuario, que buscaba aliviar la situación creada por las sequías. Este programa duró hasta 1970 e incluyó el Plan de Lucha contra las Sequías, cuyo fin era dar trabajo a los desempleados en las zonas de desastre (Florescano *et al*., 1980; Conagua, 2014b).

Como consecuencia de los efectos generados por las sequías más graves, el gobierno acordó la construcción de obras de infraestructura (presas, pozos, norias) y la aplicación de planes para mitigar las afectaciones. Por ejemplo, en 1935, en el estado de Sonora, el gobierno ordenó la distribución del agua de pozos y norias, con el propósito de dotar del líquido a la población, así como el traslado del ganado para evitar que muriera (Conagua, 2014b).

Los datos históricos ubican a 1977 como uno de los años más secos del siglo. Las pérdidas, al menos en el sector agrícola, fueron muy cuantiosas, al punto que en algunos estados de la república se calificó como un año catastrófico para la agricultura. Incluso los efectos se extendieron más allá de 1978.

Las sequías en los diversos programas hidráulicos

A partir de la creación de la Comisión para la elaboración de Plan Nacional Hidráulico se realizaron varios estudios para cuantificar el agua en las presas, la elaboración de mapas que

ISSN 2007-2422

identifican las zonas afectadas y la intensidad de la sequía, y se propusieron modelos para estimar la disponibilidad de agua; es cuando se incorpora la información técnica para el estudio de las sequías. Las sequías no se mencionan expresamente en el PNH de 1975, salvo la falta de agua en la zona norte, como freno del crecimiento de la superficie bajo riego, además de que la región no se consideró competitiva respecto a otras debido a las pocas reservas disponibles de agua (SARH, 1978: 129). En el PNH de 1981 se encuentra un apartado de fenómenos extremos, avenidas y sequías, para referenciar las sequías de los últimos 40 años y la de 1953 como la más severa, superada por la de 1977 por las áreas pequeñas que abarcó y por su intensidad, y la de 1979 por afectar de manera severa áreas pequeñas, en particular en la región Lerma (SARH, 1981: 32). El Programa Nacional de Aprovechamiento del agua 1991-1994 se refiere a la intención de racionalizar el uso del agua en épocas de estiaje, para atenuar los efectos de la sobreexplotación a través de compromisos entre usuarios y organismos operadores, pero no a la sequía (SARH, 1991: 57).

El Programa Nacional Hidráulico 1995-2000 señalaba que las sequías habían impactado el norte del país, en específico las cuencas de los ríos Nazas y Bravo. Las sequías fueron definidas como fenómenos recurrentes que se presentaban en promedio cada diez años, con duración de 1 a 3 años consecutivos, y se periodizó la ocurrencia en los últimos 50 años en tres periodos críticos: de 1948 a 1954 es el más severo; de 1960 a 1964 es de menor intensidad, pero afectó también a la mayor parte de la república; el de 1993 incidió en los estados de Coahuila, Chihuahua y Durango (Semarnap, 1996: 11).

En el Programa Nacional Hidráulico 2001-2006 se reconocía de manera expresa que las sequías eran un factor que agravaba el suministro, disponibilidad de agua superficial y recarga de acuíferos. Y que afectaba en mayor medida a la población y actividad económica en el centro, norte y noreste del país, pues ya tenía niveles peligrosamente bajos de agua per cápita (cercanos a los 2 000 m^3/hab/año) (Conagua, 2001: 23). Las causas de la sequía no se identificaban con precisión, pero se admitía que en general se debían a alteraciones de los patrones de circulación atmosférica, que a su vez eran ocasionados por el desigual calentamiento de la corteza terrestre y de las masas de agua, manifestados en fenómenos como El Niño. El Objetivo 6 de este programa planteó disminuir los riesgos y atender los efectos de inundaciones y sequías, y aumentar la capacidad del Estado para conducir y regular los fenómenos que afectan a la población, con el fin de transitar de un sistema de protección civil reactivo a uno preventivo. Para ello se planteó, entre otras cosas, el diseño de planes para el manejo de sequías; rediseño de los sistemas meteorológicos, hidroclimatológicos, geohidrológicos y de calidad del agua; difusión de boletines, avisos meteorológicos e información climatológica; instalación de centros regionales de pronóstico, y desarrollo de infraestructura para la protección de áreas productivas y centros de población (Conagua, 2001: 104). Ahora bien, ¿qué tanto de estos compromisos de la agenda pública del agua se cumplieron? No es sino hasta la fecha que se están elaborando estos programas contra las sequías y se aborda el rediseño institucional de los sistemas meteorológicos. Para ese entonces existía una dependencia de información del vecino país del norte a través de su monitor de sequía; era la forma de atender esta problemática. El Programa Nacional Hídrico 2007-2012 también planteó un objetivo 6 para prevenir los riesgos derivados de fenómenos meteorológicos e hidrometeorológicos, y atender sus efectos, con una estrategia que consistía en formular planes de prevención que permitieran enfrentar en mejores condiciones los periodos de sequía y apoyar su implementación (Conagua, 2014a: 100).

El vigente Programa Nacional Hídrico 2014-2018, elaborado en torno a la seguridad hídrica ante sequías e inundaciones (Objetivo 2), reconoce que México es un país altamente vulnerable a la sequía, principalmente en los estados del norte, como Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Durango y Zacatecas, donde el

• ISSN 2007-2422

impacto de este fenómeno puede tener consecuencias desde leves hasta catastróficas, y plantea implementar el Programa Nacional contra las Sequías (Pronacose), el cual se integra con dos componentes: programas de medidas para prevenir y enfrentar la sequía a nivel cuenca o grupos de cuenca, a partir de los 26 consejos de cuenca, a fin de trabajar con los usuarios del agua; y, en segundo lugar, ejecutar acciones para mitigar las sequías.

Las últimas sequías de este siglo en los medios: la disociación entre una política pública y el reconocimiento de un problema público

En 2011 se presentó la peor sequía en los estados del norte y centro del país, que afectó a 1 213 municipios de 19 entidades federativas (DOF 25/01/2012). Esta sequía fue registrada por las autoridades como la más importante en las últimas siete décadas, tanto así, que incidió 60% del territorio mexicano. A pesar de esto y de la trascendencia del fenómeno, no se encontró un acervo hemerográfico abundante, aunque hay que resaltar que las noticias son diversas. La prensa anunció la noticia desde diferentes perspectivas, aludiendo al sector económico, político y social. Las principales notas ofrecen cifras económico-estadísticas de los costos y alcances de este fenómeno de escasez de agua. Algunos diarios (*La Jornada*, *CNN México*, *El economista* y *El Universal*) dieron cuenta de los efectos, estrategias y montos relacionados con la sequía. También se destaca que las contingencias climáticas en el país entre 2011-2012 se presentaron en medio de un proceso electoral para cambio de presidente de la república, diputados federales y senadores, por lo que la prensa se pronunció al respecto; por ejemplo, a inicios de 2012, el diario *El Universal* publica: "Sequía: crónica de una politización anunciada".

La revisión de la prensa muestra que desde 2009 se suscitaron los primeros efectos del último episodio de sequía que en la actualidad afecta al país y el cual prácticamente pasó inadvertido para la mayor parte de la sociedad. Son muy pocas las notas que hacen referencia al fenómeno y aún más escasas aquellas donde se mencionen acciones para combatirlo. Este silencio denota insensibilidad y negación ante un hecho que poco a poco se tornaría en un grave problema que aún perdura.

Un mes después, la prensa reportó que miles de trabajadores rurales se encontraban en riesgo de quiebra si el gobierno no tomaba "medidas para amortiguar los efectos de las sequías para este 2010". También se mencionaba que los campesinos todavía no se reponían de los efectos de la sequía del año pasado y que ocasionó la pérdida de 700 000 hectáreas en todo el país, por lo que reclamaban "mayor inversión pública". Aunque el panorama se vislumbraba bastante trágico, la sequía dejó de ser cubierta por la prensa porque finalmente llegaron las lluvias y, de acuerdo con los diarios, el temporal fue generoso, pues se terminó considerando a 2010 como "el año más lluvioso del que se tenga registro". Pero aunque se haya catalogado como uno de los más lluviosos de la historia, el déficit de agua persistió. Parece que el gasto de agua realizado durante el tiempo que duró la sequía durante 2009 y parte de 2010 fue mucho mayor de lo que pudo recargarse con las lluvias (Altorre, 2010), por tanto, al haber un nuevo episodio de sequía en 2011, la escasez también se presentó y de forma más severa, ya que aparecen muchas notas periodísticas que hablan sobre la sequía (la nueva sequía) y sus efectos en México. La situación por la sequía en 2011 se tornó complicada y las declaraciones hechas por los funcionarios gubernamentales y los meteorólogos así lo confirman (*El Siglo de Torreón*, 15 de junio, Agencia Reforma). La Secretaría de Desarrollo Social mencionó: "suman ya dos millones 500 mil personas las que viven en mil 507 comunidades del país, quienes carecen de agua potable debido a la sequía". En ese mismo sentido, la Confederación Nacional Campesina (CNC) informó que: "un total de 6 millones de hectáreas de cultivo resultarían siniestradas por la inusual sequía que afecta a 15 entidades del país" (Espinosa, 2011). Por su parte, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

ISSN 2007-2422

señaló que: "las condiciones de sequía se iban a alargar", y agregó que por esta razón: "va a ser difícil que con una temporada normal de lluvia se restablezca la humedad necesaria". El balance final que dejó la sequía en 2011 fue que afectó en diferentes grados a 19 de los 32 estados del país y siniestró 2 700 000 hectáreas de frijol y maíz. Para 2012, los pronósticos no eran nada esperanzadores, pues se señalaba que la sequía (sus efectos) se recrudecería en función de que el país sería afectado por la ausencia de alimentos y de agua en 68% del territorio (Dávila, 2011). Sin embargo, pese a estos señalamientos, de nuevo las notas referentes a la sequía bajarían en cuanto a cantidad y espacio en los diarios, por lo que salen del imaginario colectivo, al no ser consideradas noticias de gran relevancia.

La contrastación de los discursos con las acciones emprendidas, tanto programáticas como financieras, en especial para acciones preventivas, permite ahora conocer si las acciones y políticas emprendidas por las autoridades fueron las correctas para enfrentar el problema o si, por el contrario, la contingencia rebasó al gobierno. Después de este episodio, y sobre todo a partir de 2012, se encuentran varias medidas gubernamentales para rediseñar la agenda pública contra la sequía.

Lo cierto es que mientras se construye desde el gobierno una política pública preventiva para atender las sequías y que el país se referencia en el ámbito internacional como un ejemplo a seguir por el Pronacose —que ya sigue los lineamientos internacionales— (WMO & GWP, 2014: 13), y se plantea un programa participativo a través de su aprobación en los Consejos de cuenca, así como la generación de información y conocimiento a través de las convocatorias sectoriales Conacyt y la creación de la Comisión Intersecretarial (Magaña, 2014), aún queda una brecha para acercar esta información a la población.

Hoy en día, la política contra la sequía se centra en la sequía que deriva de eventos hidrometeorológicos. Se ha sectorizado en la Comisión Nacional del Agua (Conagua) bajo un esquema de coordinación con otras dependencias federales y un esquema financiero cada vez más ágil para atender emergencias (Fondo de Desastres Naturales); sin embargo, las medidas preventivas siguen siendo menores, cuando los especialistas consideran que deben primarse (a través de fondos, como el Fondo de Prevención de Desastres). Bajo un esquema preventivo, que al parecer es el que subyace a la política actual, debería destinarse más inversión a las acciones apoyadas por este último Fondo, para reducir de manera progresiva las medidas reactivas que aún hoy en día tenemos. Lo innegable es que la atención preventiva se propone ya en los programas como un tema prioritario en la agenda pública del agua, y que información y conocimiento son elementos indispensables para esa política pública.

Conclusiones

El estudio de la sequía ha sido explicado desde diferentes perspectivas y disciplinas, acordes con una etapa cultural del país, pero en todas se ha hecho referencia a los efectos que produce en la economía y la población. Ha pasado de explicarse con factores divinos o culturales a una respuesta técnica y más científica. Asimismo, se está transitando de medidas gubernamentales reactivas a la propuesta de programas estructurados y con base en información técnica y científica para generar ya no sólo datos probabilísticos sino escenarios tendenciales.

Florescano *et al*. (1980: 754) consideraban en 1980 que: "en general las sequías no presentan un patrón de comportamiento definido, pudiendo afectar cualquier parte del país", pero hoy en día ya se ha encontrado un patrón espacial en las sequías de 1910, que correspondían con anomalías en la precipitación sobre el centro y sur de México (Méndez & Magaña, 2010: 1185-1186), lo cual muestra que en un corto periodo ha evolucionado la comprensión en torno a las sequías; pero ahora los factores de incertidumbre son otros, atribuibles en gran parte al cambio climático.

Los efectos de las sequías son diferenciados de acuerdo con las condiciones geográficas y cli-

• ISSN 2007-2422

máticas naturales, constitución de la población y estructura económico-productiva del territorio, estado o región. Por ejemplo, en el siglo XIX, como bien lo analizan los historiadores, los efectos inmediatos de la sequía impactaban de manera distinta en la condición de vida del campesino indígena y la del empresario agricultor. En todo caso, la severidad de una sequía depende de su duración o extensión geográfica, así como de las demandas del recurso hídrico, para la permanencia de los sistemas naturales y para el desarrollo de las actividades humanas.

La revisión de la literatura sobre las sequías muestra que en México ha sido un fenómeno recurrente y cíclico, donde las consecuencias y respuestas sociales también parecen seguir un patrón. Se observa una construcción social en torno a la sequía como problema público y en algunas épocas con gran protagonismo de la religiosidad para enfrentarla. La principal preocupación fueron los efectos agrícolas y las consecuencias que se vivían en la población, como migraciones, enfermedades o muertes, para derivar en conflictos sociales. Las grandes sequías de la historia del país coinciden con episodios de graves conflictos políticos, como la Independencia o Revolución, por un descontento social ante abusos de empresarios y grandes agricultores frente a la población que no tenía medios de subsistencia. Ante esto, ¿qué se puede aprender? Una lección es que si bien hay que atender el problema técnico que representa, a la par debe haber una política con acciones sociales no sólo de subsidio o reactiva; en una época como la nuestra, es necesario el fortalecimiento de las sociedades, grupos o poblaciones, bajo un esquema adaptativo que ya se observa en épocas pasadas, pero que hoy en día son más necesarias y complejas. ¿Es así como se están planteando la aprobación de los programas contra la sequía en los consejos de cuenca que se tienen en el vigente Programa Nacional Hídrico? ¿O es sólo la aprobación de un documento técnico final sin su participación?

Para una política actual es relevante incorporar la perspectiva social, económica y política al análisis más científico que se realiza de los efectos de estos eventos naturales; se ha demostrado la necesidad de incorporar a la población que resultará afectada, pues ellos pueden aportar la experiencia, desde la construcción de medidas de adaptación locales, en vez de aprobar un programa realizado en exclusiva por expertos, que si bien lleva datos generados, la apropiación y entendimiento social muchas veces son más determinantes, sobre todo cuando se trata de medidas de adaptación, como pueden ser las de atención contra la sequía.

Referencias

Aboites-Aguilar, L., & Camacho-Pichardo, G. (1996). Aproximación al estudio de una sequía en México. El caso de Chapala-Guadalajara (1949-1958) (pp. 259-291). En: *Historia y Desastres en América Latina*. Vol. 1. García-Acosta, V. (coord.). Bogotá: Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.

Aboites-Aguilar, L. (2013). *El Norte entre algodones. Población, trabajo agrícola y optimismo en México. 1930-1970*. México, DF: El Colegio de México.

Acuña-Soto, R., Stahle, D. W., Cleaveland, M. K., & Therrell, M. D. (2002). Megadrought and Megadeath in 16th Century Mexico. *Emerging Infectious Diseases*, *8*(4), 360-362.

Agencia Reforma (2011). Suma la sequía nueve meses en México. *El Siglo de Torreón*, 15 de junio.

Alatorre, A. (2010). Advierte Conagua desabasto por sequía. *El Mañana*, 5 de marzo.

Antón, D., & Díaz-Delgado, C. (2000). *Sequía en un mundo de agua*. San José, Costa Rica; Toluca, México: Piriguazu Ediciones-CIRA.

Berger, P., & Luckmann, N. (2003). *La construcción social de la realidad*. Buenos Aires: Amorrortu Editores.

Caballero, J. L. (2012). México, en el umbral de una sequía histórica. *El Economista*, 23 de enero.

Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Valdez-Cepeda, R. D., Méndez-González, J., & Constante-García, V. (2011). Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noroeste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *21*, 235-249.

Conagua (2001). *Programa Nacional Hidráulico 2001-2006*. México, DF: Comisión Nacional del Agua.

Conagua (2014a). *Programa Nacional Hídrico 2014-2018*. México, DF: Comisión Nacional del Agua.

Conagua (2014b). *Política Pública Nacional para la Sequía, Documento Rector*. México, DF: Comisión Nacional del Agua.

ISSN 2007-2422

Contreras-Servín, C. (abril, 2005). Las sequías en México durante el siglo XIX (2005). *Investigaciones Geográficas*, *56*, 118-133.

Coronel, A. (diciembre, 2013). Sequía: concepto e índices de monitoreo. Propuesta de un nuevo índice. *Revista Agromensajes*, *37*(1), 1-3.

Dávila, P. (2011). El próximo año habrá sequías en 68% del país: CCC. *Proceso*, 20 de diciembre.

DOF (25 de enero, 2012). Acuerdo por el que se instruyen acciones para mitigar los efectos de la sequía que atraviesan diversas entidades federativas. México, DF: Diario Oficial de la Federación.

Endfield, G. H., & Fernández-Tejeda, I. (2006). Decades of Drought, Years of Hunger: Archival Investigations of Multiple Year Droughts in Late Colonial Chihuahua. *Climatic Change*, *75*, 391-419.

Escobar-Ohmstede, A. (1997). Las sequías y sus impactos en las sociedades del México decimonónico, 1856-1900. En: *Historia y desastres en América Latina*. Vol. II. García-Acosta, V. (coord.). México, DF: Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.

Escobar-Ohmstede, A. *et al.* (2003). Épocas prehispánica y colonial (958-1822). Tomo I. En: *Desastres agrícolas en México. Catálogo histórico*. México, DF: Fondo de Cultura Económica.

Escobar-Ohmstede, A. *et al*. (2004). Siglo XIX (1822-1900). Tomo II. En: *Desastres agrícolas en México. Catálogo histórico*. México, DF: Fondo de Cultura Económica.

Espinosa, V. (2011). Pedirá CNC declarar zona de desastre en 15 entidades. *Proceso*, 20 de junio.

Florescano, E. (1980). *Análisis histórico de las sequías en México*. México, DF: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

Florescano E., Sancho y Cervera, J., & Pérez-Gavilán, D. (1980). Las sequías en México: historia características y efectos. *Comercio Exterior*, *30*(7), 747-757.

Florescano, E. (2000). *Breve historia de la sequía en México* (2a ed.). México, DF: Consejo Nacional para Cultura y las Artes.

García-Acosta, V. (julio-diciembre, 1993). Las sequías históricas de México: desastres y sociedad. *Revista semestral de la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina*, *1*(1), 5-185.

Garza-Merodio, G. G. (2002). Frecuencia y duración de sequías en la cuenca de México de fines del siglo XVI a mediados del XIX. *Investigaciones Geográficas*, *48*, 106-115.

Garza-Merodio, G. G. (agosto, 2007). Climatología histórica: las ciudades mexicanas ante la sequía (siglos XVII al XIX) (2007). *Investigaciones Geográficas*, *63*, 77-92.

Higuera, C. (2011). 2.5 millones de mexicanos, sin agua por sequía. *La Crónica*, 29 de noviembre.

IPCC (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis*. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Equipo principal de redacción: Pachauri, R. K., & Meyer L.A. (eds.). Ginebra: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, IPCC.

Magaña, V. (2014). *Plan general maestro estratégico de investigación en materia de sequía, Premia*. México, DF: Comisión Nacional del Agua.

Méndez, M., & Magaña, V. (2010). Regional aspects of prolonged meteorological droughts over México and Central America. In: *Special US Claver Drought Collection, American Meteorological Society*, *23*, 1175-1188.

Ortega-Gaucin, D., & Velasco, I. (2013). Aspectos socioeconómicos y ambientales de las sequías en México. *Aqua-LAC*, *5*(2), 78-90.

Sánchez, J. (2010). Demandan plan contra las sequías. *El Universal*, 1 de abril.

Sánchez-Mora, E. (1980). Las sequías en el México antiguo (pp. 75-76). En: *Análisis histórico de las sequías en México*. Florescano, E. (coord.). México, DF: SARH.

Sancho y Cervera, J., Marengo-Mogollón, H., Escalante-Mar, F., & Padilla-Ríos, G. (1977). *Evaluación de la sequía de 1977*. México, DF: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

SARH (1978). *Plan Nacional Hidráulico 1975*. México, DF: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

SARH (1981). *Plan Nacional Hidráulico 1981*. México, DF: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

SARH (1991). *Programa Nacional de Aprovechamiento del Agua 1991-1994*. México, DF: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

Semarnap (1996). *Programa Hidráulico 1995-2000*. México, DF: Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Natural y Pesca.

Semarnat-INE (2009). México. Cuarta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. México, DF: Semarnat-INE.

Sequía en Tamaulipas daña 7 400 hectáreas. *Proceso*, 28 de agosto 2009.

Sosa-Nájera, S., Lozano-García, S., Priyadarsi, D., Roy, P., & Caballero, M. (2010). Registro de sequías históricas en el occidente de México con base en el análisis elemental de sedimentos lacustres: el caso del lago de Santa María del Oro. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, *62*(3), 437-451.

Stahle, D. W., Villanueva, J., Burnette, D. J., Cerano, J., Heim Jr., R. R., Fye, F. K., Acuña, R., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K., & Stahle, D. K. (2011). Major Mesoamerican Droughts of the Past Millennium. *Geophysical Research Letters*, *38*, 1-4.

WMO-GWP (2014). National Drought Management Policy Guidelines: A Template for Action. Genova: World Meteorological Organization and Global Water Partnership.

• ISSN 2007-2422

Dirección institucional de la autora

Dra. Judith Domínguez Serrano

Profesora-Investigadora
El Colegio de México, A.C.
Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales
Camino al Ajusco 20, Col. Pedregal de Santa Teresa,
Delegación Tlalpan
10740 Ciudad de México, México
Teléfono: +52 (55) 54493 000
judithdominguez@colmex.mx

Haga clic aquí para escribir al autor

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 77-93
ISSN 2007-2422

Sequía en Durango, México.

Foto: Oscar Alonso Barrón.

Ciudades y sequía en México. La gestión del agua como estrategia crítica de mitigación

• Nicolás Pineda-Pablos* • Alejandro Salazar-Adams •
El Colegio de Sonora
*Autor para correspondencia

Resumen

Pineda-Pablos, N., & Salazar-Adams, A. (septiembre-octubre, 2016). Ciudades y sequía en México. La gestión del agua como estrategia crítica de mitigación. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *7*(5), 95-113.

El objetivo de este trabajo es presentar y revisar las principales opciones de estrategia que tienen las ciudades mexicanas contra la sequía. Las ideas centrales son las siguientes: 1) que la sequía no tiene un efecto directo en los sistemas urbanos de agua sino que está mediada por la infraestructura y gestión del agua; 2) que la mitigación del impacto de la sequía debe llevarse a cabo primordialmente por medio de la gestión adaptativa de la demanda de agua; 3) que el principal obstáculo para que las ciudades efectúen una gestión adaptativa del agua es la falta de sistemas de información confiable. En el trabajo se revisa el impacto de la sequía en los municipios urbanos de México. Se propone un modelo para el análisis del impacto de la sequía en el que la gestión del agua es el elemento crítico y se señala que el principal obstáculo para que los organismos de agua enfrenten y mitiguen la sequía es la carencia de un sistema de información y seguimiento de indicadores que permita dar seguimiento a las pérdidas de agua, medición de consumos y cobro efectivo del servicio. El establecimiento de sistemas de información y el mejoramiento de estas áreas de oportunidad constituye el paso crítico hacia adelante para que los organismos emprendan de manera más efectiva y sustentable acciones que mitiguen los efectos de las sequías. A este tipo de gestión le estamos llamando gestión adaptativa del agua.

Palabras clave: gestión urbana del agua, mitigación de la sequía, gestión adaptativa, manejo de información hídrica, ciudades mexicanas.

Abstract

Pineda-Pablos, N., & Salazar-Adams, A. (September-October, 2016). Cities and Drought in Mexico. Water Management as a Mitigation Critical Strategy. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 7(5), 95-113.*

The purpose of this article is to present and review the main strategy choices for Mexican cities against drought. The main ideas are: 1) that drought has not a direct effect on urban water systems but it is mediated by water infrastructure and by management; 2) that drought impact mitigation should be carried out mainly through adaptive water demand management; and 3) that the main obstacle for cities to carry out adaptive water management is the lack of reliable information systems. The article reviews the exposure of Mexico's urban municipalities to drought, presents a model for the analysis of drought impact where water management is the critical element and points out that the main obstacle for water utilities tackle and mitigate drought is the lack of an information and indicator system to monitor water waste, meter consumption and effective revenue collection. The establishment of information management and the improvement of these opportunity areas constitute the critical step forward for utilities undertake more effectively and sustainably actions against the recurrent droughts. This kind of management is what we call adaptive water management.

Keywords: *Urban water management, drought mitigation, adaptive management, water information management, Mexican cities.*

Recibido: 06/08/2015
Aceptado: 15/02/2016

Introducción

El problema del impacto de la sequía en el consumo de agua de las ciudades mexicanas se puede definir en tres escenas: en la escena uno, las ciudades no han dejado de crecer cuando menos desde 1940 y constantemente han requerido nuevas fuentes de agua y nueva infraestructura hidráulica, como presas, pozos, acueductos, tanques de almacenamiento y redes de distribución, entre otras. Escena dos: las ciudades enfrentan desde la década de 1990 reducciones recurrentes en el agua disponible, en la que se conjugan sequía, mala gestión y crecimiento urbano. Escena tres: las ciudades buscan aumentar el abasto de agua con nueva infraestructura cada vez más cara y de fuentes cada vez más lejanas sin modificar la gestión ni los patrones de consumo de agua, además de existir un factor de incertidumbre introducido por el fenómeno del cambio climático, que de acuerdo con los modelos actualmente disponibles induciría una reducción de la precipitación en el país y un aumento en la temperatura a lo largo del siglo XXI (Montero & Pérez, 2008), lo que repercutiría en una disminución en la cantidad de agua disponible y un incremento en la demanda. Este es el resumen del problema de la gestión urbana del agua en las ciudades mexicanas. ¿Qué se debe hacer?

Los directivos de los organismos de agua por lo común tienden a favorecer la alternativa de más infraestructura porque tienen acceso a financiamiento y les representa oportunidades de más ingresos y lucimiento político. En cambio, la alternativa de mejorar la gestión se considera menos viable debido principalmente a que, de entrada, la mayoría de los organismos operadores de agua carece del sistema de información y seguimiento de indicadores que le permita definir políticas y tomar las decisiones correspondientes.

En este artículo se plantea que lo que deben hacer las ciudades mexicanas para mitigar los efectos de la sequía sin deteriorar la calidad del servicio es administrar y moderar la demanda de agua. Las preguntas que se plantean son: ¿cómo se da el impacto de las sequías en los servicios urbanos de agua?, ¿qué tipo de respuesta deben dar los organismos operadores?, ¿cuál es el principal obstáculo para enfrentar y mitigar los efectos de la sequía en las ciudades mexicanas?

El objetivo de este trabajo es entonces presentar y revisar las principales opciones de estrategia que tienen las ciudades mexicanas contra la sequía. Las ideas centrales son las siguientes: 1) que la sequía no tiene un efecto directo en los sistemas urbanos de agua sino que está mediada por la infraestructura y gestión del recurso; 2) que la mitigación del impacto de la sequía debe estar orientada primordialmente a la gestión adaptativa de la demanda de agua; 3) que el principal obstáculo para que las ciudades lleven a cabo una gestión adaptativa del agua es la falta de sistemas confiables de información.

Es necesario advertir que las estrategias para mitigar la sequía que se presentan en este trabajo se circunscriben al ámbito de la gestión urbana del agua y no incluyen el ámbito más amplio de la gestión integrada por cuencas ni la interacción con los usos agrícolas que, por regla general, son los principales consumidores de agua de las cuencas. Otra limitación es que tampoco se revisa la situación de los servicios de alcantarillado y saneamiento. Se trata entonces exclusivamente de discutir las medidas que pueden adoptar por sí solos los organismos operadores de agua urbana en el ámbito local o municipal sin recurrir a la transferencia de derechos de agua de uso agrícola y sin incluir el reúso de aguas residuales.

La exposición de las ciudades mexicanas a la sequía

¿Qué tan expuestas están las ciudades mexicanas a la sequía? La respuesta a esta pregunta depende de cómo se defina sequía. Las definiciones de sequía se pueden dividir en dos grupos: las que se refieren al fenómeno climático meteorológico en sí mismo y las que aluden a sus efectos o consecuencias.

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 95-113 • ISSN 2007-2422

Como fenómeno climático meteorológico, la sequía es una reducción de la cantidad de agua disponible por una deficiencia de precipitación durante un periodo extendido de tiempo (por lo general una estación o más). En este sentido, el fenómeno de la sequía se relaciona con los comportamientos históricos de la precipitación y disponibilidad de agua, y es por lo tanto relativo a los niveles o promedios registrados de precipitación y humedad en un lugar determinado. De este modo, la sequía equivale a que llueva menos que lo acostumbrado o menos que el promedio en un punto geográfico particular durante un periodo prolongado (OMM, 2015; National Drought Mitigation Center, 2015; National Geographic, 2015). La sequía se diferencia de la aridez en cuanto a que la primera es una reducción relativa con respecto a los niveles anteriores, mientras que la segunda se refiere a la carencia absoluta y permanente de humedad y precipitación. Por ello, la sequía no es privativa de lugares áridos sino que cualquier lugar, árido o húmedo, puede padecer un periodo de sequía; es decir, una reducción relativa de humedad y disponibilidad de agua.

Otras definiciones de sequía la relacionan con las consecuencias que tiene para las actividades humanas. Una definición de sequía, que incluye una mención al impacto social, es por ejemplo: "Disminución temporal y significativa de los recursos hídricos que afecta un área extensa con *consecuencias socioeconómicas adversas* durante un periodo suficientemente *prolongado*" (Estrela-Monreal, 2006). Las definiciones que utilizan los monitores de sequía de América del Norte (DOF, 2012) para los diferentes niveles de intensidad también ponen la atención en los efectos de la sequía. De este modo, los cinco niveles de intensidad son los siguientes:

- **Anormalmente seco (D0)**: condición de sequedad, no es un tipo de sequía.
- **Sequía moderada (D1)**: algunos daños a los cultivos y pastos; alto riesgo de incendios; niveles bajos en arroyos, embalses y pozos; escasez de agua.
- **Sequía severa (D2)**: probables pérdidas en cultivos o pastos; muy alto riesgo de incendios; común escasez de agua.
- **Sequía extrema (D3)**: mayores pérdidas en cultivos o pastos; peligro extremo de incendio; se generaliza la escasez de agua o restricciones de su uso.
- **Sequía excepcional (D4)**: pérdidas excepcionales y generalizadas de los cultivos o pastos; riesgo excepcional de incendio; escasez de agua en los embalses, arroyos y pozos; situaciones de emergencia debido a la ausencia de agua.

Estas definiciones ponen la atención en los efectos o consecuencias socioeconómicas de la sequía. El problema con esta definición es que incluye en ella precisamente los elementos que se desea prever y mitigar, es decir, los impactos negativos de la misma.

Este trabajo, al hablar de sequía, se refiere principalmente a la que se ha denominado sequía meteorológica, esto es, aquella que pone énfasis en el fenómeno climático y se define como "la desviación de la precipitación respecto a la media durante un periodo de tiempo determinado" (Marcos-Valiente, 2001). Para fines prácticos, en este trabajo se adopta la información de sequía meteorológica publicada por el Servicio Meteorológico Nacional de México en su página Web, con cinco niveles de intensidad, que en los mapas corresponden a colores que van del amarillo al rojo intenso. Se trata de ver cómo un fenómeno natural impacta a una sociedad en particular. ¿Cuáles ciudades están entonces expuestas a la sequía?

En México, la gráfica del área afectada por la sequía de 2003 a 2014 (figura 1) muestra que la sequía es un evento constante y recurrente en el territorio nacional. Se observa además que los diversos rangos de sequía han afectado a la mayor parte del área del país. De 2003 a 2014, la sequía severa (que se muestra con color gris medio) estuvo presente en cuando menos una tercera parte del territorio nacional de 2006 a 2009. En 2010 hubo una tregua, pero regresó con gran intensidad en 2011, cuando se hizo

ISSN 2007-2422

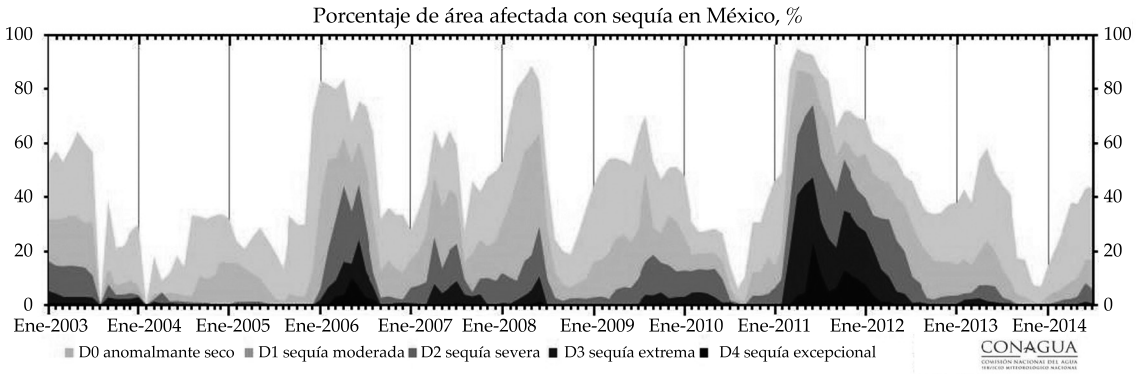


Figura 1. Evolución de la sequía según el Monitor de Sequía en México.
Fuente: SMN, 2010.

presente en tres cuartas partes del territorio nacional, constituyendo la sequía más intensa durante el periodo.

La sequía del verano de 2011, que afectó a la mayor parte del territorio nacional, se reportó como excepcional en 12 municipios urbanos de los estados de Chihuahua, Coahuila, Sonora y Tamaulipas. Esta misma sequía de 2011 fue considerada como extrema en 120 municipios urbanos de 15 estados de las 32 entidades federativas (Chihuahua, Coahuila, Distrito Federal, Durango, Guanajuato, Hidalgo, México, Michoacán, Nuevo León, Querétaro, Sonora, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz y Zacatecas). Asimismo, se reportó sequía severa en otros 124 municipios urbanos (figura 2). Se trata de la sequía más intensa que reporta el Monitor de Sequía de México desde que inició con el seguimiento de este fenómeno en 2003, pero no quiere decir que sea el más intenso que se haya padecido en la historia reciente de México (figura 2).

Por otra parte, la sequía recurrente no se hace presente en los mismos lugares del territorio nacional. La sequía reportada el 30 de junio de 2015 muestra que ese año se vieron afectados lugares que no fueron tocados en la sequía de 2011. El 30 de junio de 2015 no se reportan municipios urbanos con sequía excepcional; pero sí con sequía extrema los municipios de Tijuana y Playas de Rosarito; así como con sequía severa los municipios de Mexicali, Ensenada y Tecate, todos ellos en el estado de Baja California, que no estuvo entre las entidades reportadas con sequía en 2011.

De este modo, prácticamente todas las ciudades de México están expuestas a la sequía y queda de manifiesto que este fenómeno no es exclusivo de lugares secos o desérticos, sino que la mayoría de las ciudades de México se ubican en lugares expuestos y propensos a la sequía, y que la han padecido en la última década. Esta sequía, sin embargo, tiende a ser más intensa en el norte de México que en el resto del país.

El impacto mediado de la sequía en las ciudades

A pesar de que la mayoría de las ciudades mexicanas ha estado expuesta a la sequía en los últimos años, no hay una conciencia clara entre los habitantes de las ciudades ni entre los directivos de organismos operadores de agua potable, alcantarillado y saneamiento (OOAPAS) del impacto de este fenómeno en las ciudades o que éstas tengan que prevenir sus efectos. Pareciera que se percibe a la ciudad como un entorno distinto de la naturaleza, cuando en realidad el sistema de abastecimiento de agua potable y saneamiento de las ciudades está estrechamente vinculado con el medio ambiente que lo rodea (Kaica, 2005; Harvey, 1996). Del medio ambiente

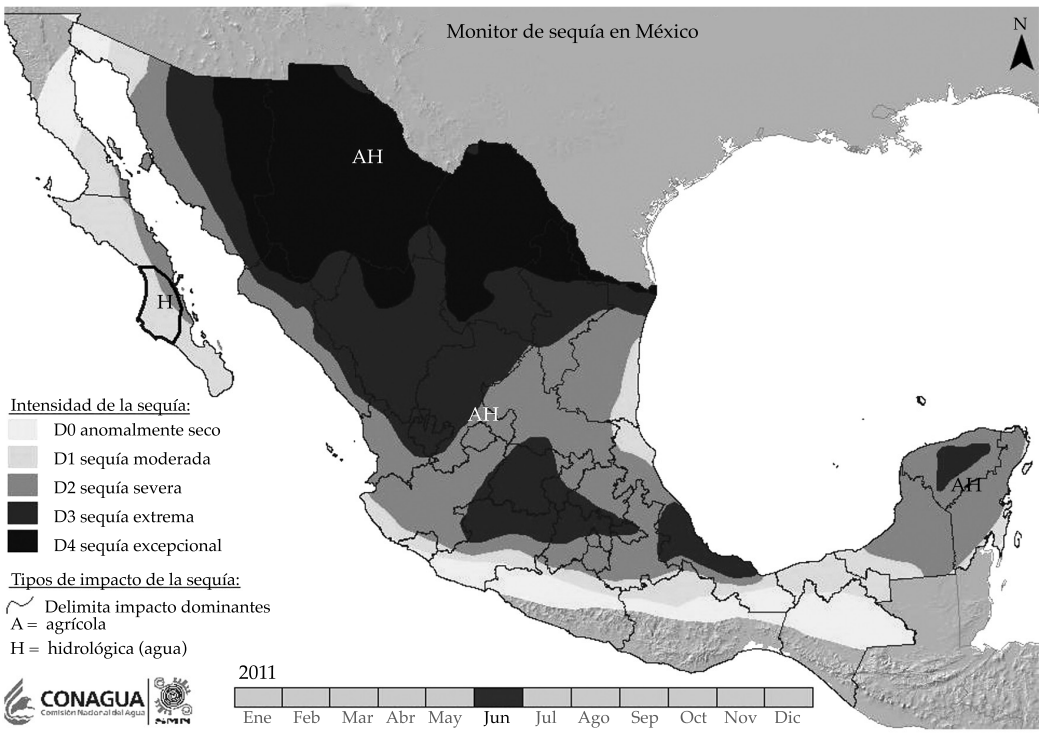


Figura 2. Mapa de la sequía en México al 30 de junio de 2011. Fuente: SMN, 2015.

provienen las fuentes de abastecimiento y al medio ambiente se regresan también las aguas residuales.

Este problema de percepción se debe a que el impacto de las sequías en las ciudades no es directo, sino que está mediado por dos elementos que pueden identificarse como infraestructura hidráulica y gestión urbana del agua. De este modo, para diseñar un modelo de impacto de la sequía en la gestión urbana del agua, se pueden considerar los siguientes elementos (figura 3):

- Fenómeno de la sequía.
- Infraestructura hidráulica (de abasto y almacenamiento).
- Gestión urbana del agua.
- Patrón de consumo de la ciudad.

Estos cuatro elementos están estrechamente relacionados y definen el impacto de la sequía en los consumidores urbanos, así como la posible respuesta urbana ante este fenómeno. Desde un punto de vista más amplio, estos elementos constituyen además el ciclo urbano del agua, que se inicia con la extracción y abasto de agua para la ciudad; almacenamiento y distribución; uso y consumo del recurso, y la disposición, tratamiento y descarga de aguas residuales (Marsalek *et al*., 2008).

La función del impacto de la sequía en las ciudades puede expresarse con el siguiente modelo:

$$Y = +S - I - G$$

Donde:

Y = **impacto** de la sequía en los patrones de consumo.
S = reducción de la disponibilidad de agua debido a la **sequía**.
I = efecto retardador y regulador de la **infraestructura**.
G = efecto regulador de la **gestión** en los patrones de consumo.

ISSN 2007-2422

Cuadro 1. Municipios urbanos en los que se reportó sequía en el verano de 2011. Fuente: SMN, 2010.

Intensidad	Entidad	Municipios urbanos afectados por la sequía de 2011	Núm.
Sequía excepcional (D4)	Chihuahua	Chihuahua, Cuauhtémoc, Nuevo Casas Grandes, Delicias, Hidalgo del Parral	5
	Coahuila	Monclova, Piedras Negras, Acuña, Frontera, Nava	5
	Sonora	Agua Prieta	1
	Tamaulipas	Nuevo Laredo	1
Total			**12**
Sequía extrema (D3)	Chihuahua	Juárez	1
	Coahuila	Saltillo, Torreón, Ramos Arizpe	3
	Distrito Federal	Gustavo A. Madero, Miguel Hidalgo, Venustiano Carranza, Azcapotzalco, Cuauhtémoc	5
	Durango	Durango, Gómez Palacio, Lerdo	3
	Guanajuato	León, Irapuato, Celaya, Salamanca, Guanajuato, Acámbaro, San Miguel de Allende, San Francisco del Rincón, Uriangato, Dolores Hidalgo, San Luis de la Paz, Valle de Santiago, Purísima del Rincón, Silao, Cortázar, Moroleón, Pénjamo	17
	Hidalgo	Tula de Allende	1
	México	Toluca, Ecatepec de Morelos, Cuautitlán Izcalli, Naucalpan de Juárez, Atizapán de Zaragoza, Tlalnepantla de Baz, Tultitlán, Texcoco, Nicolás Romero, Chimalhuacán, Tecámac, Acolman, Huixquilucan, Zinacantepec, Chicoloapan, Zumpango, Coacalco de Berriozábal, Teoloyucán, Tultepec, Cuautitlán, Tepotzotlán, Lerma, Coyotepec, Melchor Ocampo, Chiautla, Atenco, Chiconcuac, Otzolotepec, Tepetlaoxtoc, Almoloya de Juárez, Tezoyuca, Papalotla, Jaltenco, Teotihuacán	34
	Michoacán	Morelia, Uruapan, Zitácuaro, La Piedad, Zamora, Zacapu, Hidalgo, Pátzcuaro, Jacona	9
	Nuevo León	Monterrey, Guadalupe, Santiago, Apodaca, San Nicolás de los Garza, Gral. Escobedo, San Pedro Garza García, Santa Catarina, Cadereyta Jiménez, Juárez, García, Salinas Victoria	12
	Querétaro	Querétaro, San Juan del Río, Corregidora, El Marqués	4
	Sonora	Cajeme, Navojoa, Nogales	3
	Tamaulipas	Reynosa, Matamoros, Río Bravo	3
	Tlaxcala	Tetla, Apizaco, Xaloztoc, Yauhquemecan, Tzompantepec	5
	Veracruz	Xalapa, Veracruz, Córdoba, Boca del Río, Orizaba, Fortín, Ixtaczoquitlán, San Andrés Tuxtla, Nogales, Río Blanco, Camerino Z. Mendoza, Rafael Delgado, Amatlán de los Reyes, Banderilla, Huiloapan, Ixhuatlancillo, Mariano Escobedo	17
	Zacatecas	Fresnillo, Zacatecas, Guadalupe	3
Total			**120**

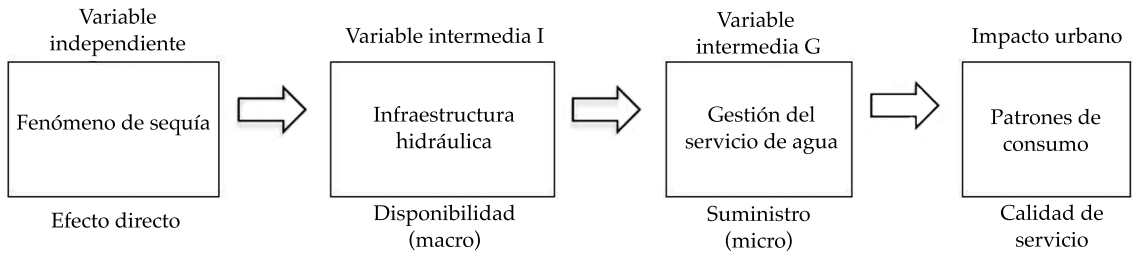


Figura 3. Elementos para el análisis del impacto de la sequía en las ciudades.
Fuente: elaboración propia, basado en el marco de análisis y desarrollo institucional de E. Ostrom (2007).

• ISSN 2007-2422

Lo que se busca es minimizar el impacto Y, el cual idealmente sería igual a cero, pero esto implicaría poder anticipar de manera perfecta las variaciones climáticas que denominamos sequía o bien contar con recursos ilimitados para contrarrestar los efectos negativos de la sequía en su totalidad. Sin embargo, para ilustrar el efecto de las variables en el modelo, supóngase que el objetivo es hacer que el impacto sea nulo, es decir, Y = 0. Entonces infraestructura y gestión deberán ser de signo contrario e inversamente proporcionales al monto de la sequía. Por ejemplo, si la sequía impone una reducción de 30% en la disponibilidad de agua, infraestructura y gestión deberán compensar dicho monto: la infraestructura deberá proporcionar un aumento en el suministro o bien la gestión requiere propiciar una reducción de 30% en los patrones de consumo. También puede darse una combinación de ambos.

Cada uno de estos dos elementos, (infraestructura de abasto y gestión), tiene su propia dinámica y forma para mitigar o aumentar el impacto de la sequía en la ciudad. A continuación se revisa de manera breve la dinámica de estos dos componentes.

Con base en este modelo, si el impacto esperado de la sequía es 0 (cero), entonces:

a) $S = I + G$

Es decir, el efecto conjunto de la infraestructura y gestión deberá compensar al efecto de la sequía:

b) $I = S - G$

La capacidad de almacenamiento de la infraestructura debe ser igual a la reducción en disponibilidad provocada por la sequía menos el chorro de agua que se logre por medio de la gestión. Si la capacidad de almacenamiento de la infraestructura es nula, entonces la gestión deberá reducir todo el efecto de la sequía (reducción conjunta de pérdidas y consumos). Si la capacidad de almacenamiento de la infraestructura es muy grande, por ejemplo en un acuífero, entonces la infraestructura (pozos) podrá aportar toda la diferencia impuesta por la reducción de disponibilidad y el efecto de la gestión podrá ser 0 (cero).

c) $G = S - I$

La gestión tiene la función de compensar la reducción de la sequía de manera más directa que la infraestructura. Si la (capacidad de almacenamiento de la) infraestructura es cero, el tamaño del ajuste de la gestión deberá ser equivalente al tamaño de la reducción de la sequía. La ventaja de la gestión es que no todo es disminución del consumo, sino que ajusta principalmente la baja de pérdidas físicas de agua y los excesos de consumo antes que recortar propiamente el consumo. Mientras que la infraestructura son los ahorros, la gestión ajusta el gasto. La gestión representa entonces el ajuste y medida más efectiva para mitigar la sequía. Ésta es la gestión adaptativa del agua en las ciudades.

Este modelo resume entonces el impacto de la sequía en la ciudad y ayuda a analizar los diversos papeles que juegan la infraestructura y la gestión. Sin embargo, el modelo concreto es diferente para cada ciudad, pues cada urbe tiene diferentes tipos de fuentes de abasto y distinta infraestructura, estilos de gestión y patrones de consumo.

Infraestructura hidráulica y sequía

La infraestructura por medio del almacenamiento del agua es un amortiguador o factor intermedio entre las sequías y el impacto que esa tiene en el consumo de agua de la ciudad. El tipo de infraestructura depende del tipo de fuente. Cuando la fuente de abasto de agua es superficial, la infraestructura hidráulica consiste en presas y reservorios, acueductos y canales de conducción, y plantas potabilizadoras. Cuando la fuente de abasto es subterránea, la infraestructura hidráulica consiste en pozos, acueductos y bombeo impulsado con energía eléctrica. Otras posibles fuentes de abasto pueden ser el agua salobre del mar o de las regiones costeras, para

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 95-113
ISSN 2007-2422

Cuadro 2. Infraestructura hidráulica para el abasto urbano de agua. Fuente: elaboración propia.

Fuente de abasto	Infraestructura hidráulica	Impacto urbano
Superficial: - Río - Lago	- Presas - Acueductos - Planta potabilizadora	El impacto de la sequía en la ciudad está mediado por la capacidad de almacenamiento de las presas
Subterránea - Acuífero	- Pozos y bombeo	El impacto de la sequía es mediado por el volumen de recarga del acuífero y la capacidad de almacenamiento total del acuífero
Otros: - Agua de mar - Aguas residuales	- Planta desalinizadora - Plantas de tratamiento	La sequía no afecta la disponibilidad de agua de mar La disponibilidad de aguas residuales tratadas se determina por el volumen de agua que consume la ciudad y patrones de consumo. La sequía no tiene impacto directo en las aguas residuales tratadas

lo cual se requiere una planta desalinizadora; o bien el reúso de las aguas residuales, lo que también requiere de plantas de tratamiento de aguas grises (Karamouz, Moridi, & Nazif, 2010; Jardines-Moreno, 2008). De este modo, el impacto de las sequías es directo en los cuerpos de agua, pero para las ciudades está mediado por el tipo de fuente de abasto con que cuentan y el tipo de infraestructura que requieren.

Normalmente la infraestructura juega el papel de amortiguador de los efectos de la sequía en las ciudades, y cuando la sequía no es muy prolongada y la infraestructura está bien administrada, hace que las urbes no resientan sus efectos. Para ello se requiere adoptar la antigua estrategia de planeación para años de "vacas flacas y vacas gordas", es decir, tomar en cuenta las fluctuaciones de la disponibilidad en los cuerpos de agua. Se requiere, además, dejar y respetar una reserva de base para la naturaleza y no agotar todos los recursos disponibles. El error que se comete con mucha frecuencia es sobreasignar y sobreexplotar los recursos (Moreno-Vázquez, Marañón-Pimentel, & López-Córdova, 2010; Torregrosa, 2015). De modo que en tiempos normales se explotan los recursos al máximo y en tiempos de contracciones severas, como los que significa una sequía, los organismos de agua no cuentan con los márgenes de reserva, y buscan aumentar las fuentes de suministro y agregar nueva infraestructura.

Un aspecto relevante de la infraestructura hidráulica es que tiene un marco institucional propio y diferente al de la gestión urbana del agua. En México, la construcción y mantenimiento de las presas y acueductos, así como el monitoreo de los acuíferos, están centralizados y son administrados por la Comisión Nacional del Agua (Conagua), organismo dependiente de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). Esta dependencia recaba la información, y controla los embalses y dotaciones de agua a los diferentes tipos de agua. Aunque se dan deficiencias en la planeación y operación de estas tareas que se manifiestan en la sobreasignación y la sobreexplotación de los cuerpos de agua, el hecho de que exista un sistema de información uniforme constituye un avance en la disponibilidad de información y definición de políticas. En décadas pasadas, los antecesores de esta agencia lograron alcanzar un alto nivel de capacidad técnica y fueron bastante exitosos en el impulso y operación de infraestructura hidráulica. En la actualidad, sin embargo, enfrentan el reto del nuevo paradigma ambiental y de reconvertir su antiguo enfoque en la infraestructura y oferta al enfoque de demanda (Wester, Rap, & Vargas-Velázquez, 2009).

El uso preferente de la infraestructura como medio de previsión y mitigación de la sequía constituye el modelo de gestión que se conoce como "enfoque de oferta". Este enfoque implica que toda la atención se centra en el suministro de agua y no se toma en cuenta el posible consumo excesivo o inapropiado del agua. Cuando la infraestructura se financia con recursos fiscales

• ISSN 2007-2422

y no implica costos para los sistemas urbanos de agua, dicho enfoque incentiva a las ciudades a buscar preferentemente el aumento del suministro de agua. Para ello, se pretende agregar siempre fuentes nuevas y más remotas a costos cada vez más altos. El problema de este enfoque es que cada vez resulta más caro e insostenible para el país que cubre estas obras con recursos fiscales; no envía señales de los costos en que incurre a los habitantes de las grandes ciudades; tiende a crear conflictos con los habitantes de las regiones de las que se extrae el agua, e incrementa de modo desproporcionado la huella ecológica o impacto que se tiene en la naturaleza. Dicho en otras palabras, este enfoque no propicia ni apoya la sustentabilidad urbana.

La misma Conagua, a través de su publicación *Agenda del Agua 2030* (Conagua, 2011), reconoce que las obras de infraestructura significan una menor tasa de beneficio/costo que la que pueden representar medidas de gestión que no implican realizar grandes obras públicas. La figura 4 muestra los costos marginales de las diferentes medidas de oferta y del uso público urbano (denominadas de gestión o de demanda), junto con otras medidas industriales o agrícolas, e indica que mientras las medidas de oferta tienen altos costos marginales, las de uso público urbano tienen costos negativos; es decir, sus beneficios pagan con creces los costos. Por ejemplo, el costo marginal de "nuevas presas para riego" es de alrededor de un peso por metro cúbico, mientras que la medida "reparación de fugas" tiene un costo marginal negativo de casi seis pesos por metro cúbico; esto es, por cada metro cúbico que se deje de fugar, se obtendrá un ahorro neto de seis pesos en la producción de agua. Además, la medida de "acueductos no en cartera" tiene un costo marginal de más de cinco pesos por metro cúbico y la "desalación no en cartera", un costo de casi 23 pesos por metro cúbico. Nótese

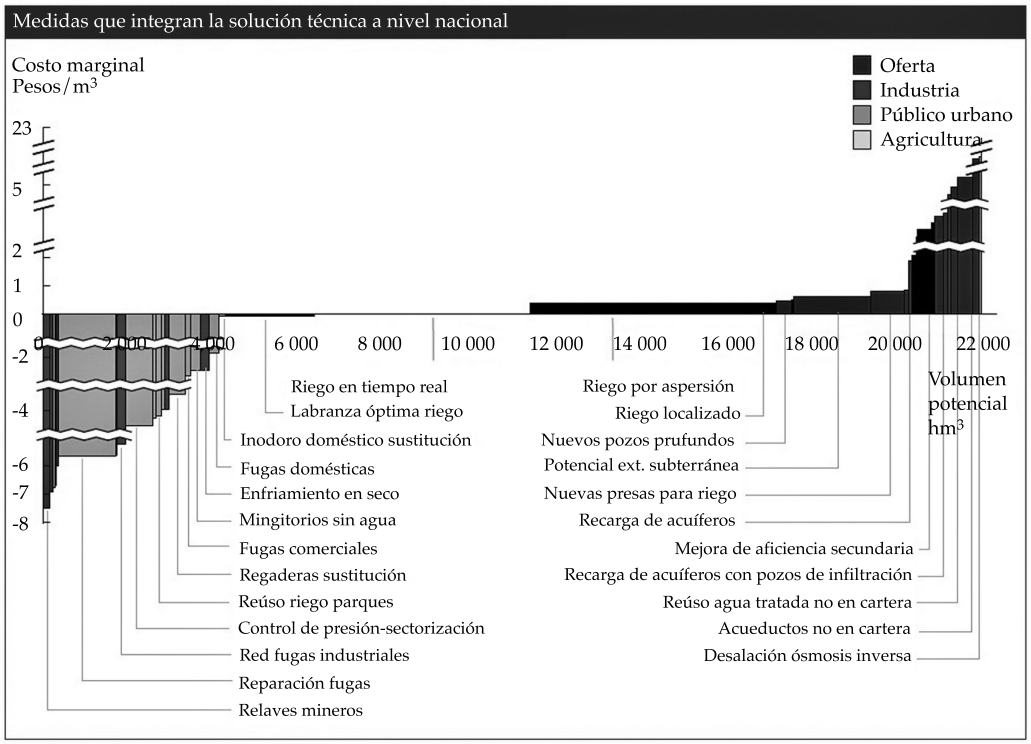


Figura 4. Comparación de volúmenes y costo marginal de medidas para abasto de agua. Fuente: Conagua, 2011.

además que el volumen potencial para estas opciones es muy pequeño, en comparación con las opciones orientadas al uso más eficiente del agua. Por otra parte, el eje horizontal muestra el caudal de agua que es posible recuperar (volumen potencial), donde se aprecia que si bien las obras de infraestructura muestran caudales muy superiores, la reparación de fugas puede recuperar un volumen cercano a 2 000 hm^3 (dos mil millones de metros cúbicos). En conjunto, a través de la reducción de fugas y de hacer más eficiente el consumo, se pueden recuperar, potencialmente a nivel nacional, alrededor de 4 000 millones de metros cúbicos, es decir, un monto equivalente aproximadamente a cuatro veces el consumo de la Ciudad de México.

En resumen, si bien la infraestructura hidráulica para el abasto de agua a las ciudades es indispensable y ayuda a contrarrestar los efectos de la sequía mediante el suministro y almacenamiento de volúmenes de agua que pueden ser utilizados en periodos de baja disponibilidad, no puede ser el único elemento ni la única estrategia para mitigar los efectos. Para tener una estrategia más integral y apoyar la sustentabilidad urbana, se requiere además la buena gestión urbana del agua.

Gestión urbana del agua y sequía

El segundo elemento que intermedia o amortigua el impacto de la sequía en las ciudades es la gestión del agua. Se refiere básicamente a la operación de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento. La manera en que operan estos servicios hídricos tiene un impacto definitivo en el nivel y características de la demanda de agua, y el grado de adaptación de la ciudad a la sequía.

Una característica de la gestión urbana del agua es que, a diferencia de lo que sucede con la construcción y manejo de la infraestructura, la gestión urbana del agua está descentralizada, intervienen una pluralidad de actores institucionales locales y es llevada a cabo principalmente por organismos operadores de agua (OOAPAS). Estos organismos, por regla general, son entidades públicas descentralizadas de los gobiernos estatales o municipales dotados de autonomía legal, y que supuestamente debieran operar como empresas autosuficientes y autónomas. En algunos pocos casos, como Aguascalientes, Cancún o Saltillo, existe participación de empresas privadas en la operación de estos servicios, pero en el resto de los municipios urbanos, los organismos dependen directamente de los gobiernos municipales o estatales. Las leyes que rigen la operación de estos OOAPAS son estatales y no federales, como en el caso de la infraestructura. De este modo, cada una de las 32 entidades federativas del país cuenta con su propia ley de aguas, que define los criterios de operación de tales organismos (Carabias & Landa, 2005). Existe, por lo tanto, diversidad de situación y circunstancias, así como una gran variación en el desempeño que tienen estos OOAPAS. En cuanto al personal técnico y directivo encargado de la gestión urbana del agua, se observa una tendencia hacia una alta rotación y bajo nivel de profesionalización. Asimismo, existe un déficit de planeación. Estas condiciones se deben principalmente a que cada cambio de gobierno local significa la remoción de los directivos y la designación de otros nuevos al frente de los OOAPAS (Pineda-Pablos, Salazar-Adams, & Buenfil-Rodríguez, 2010). De este modo, el marco institucional de la gestión contrasta con el que rige para la infraestructura, que es nacional, centralizada y tiende a la uniformidad.

En el caso de la gestión urbana del agua, el panorama de la información es diferente al de la infraestructura. Cada organismo de agua hace su propias mediciones y recaba su propia información, y en muchos casos no se hacen ni mediciones ni se registran las bases de datos históricos. Puesto que los organismos están sometidos a periodos de dirección muy cortos (de 3 o 6 años, según sea el nivel de gobierno municipal o estatal del que dependen), por lo general no dan importancia a la planeación y previsión de plazos mayores que los de su gestión. Por ello, el cuidado que se pone en la información es poco y se da más atención a la operación inmediata y a las metas de corto

plazo. Como la medición implica gastos en medidores y mano de obra, con mucha frecuencia ésta no se lleva a cabo, y se realizan más bien meras aproximaciones o estimaciones. Además, puesto que cada organismo lleva su propia información, el sistema está totalmente descentralizado y no existe uniformidad ni en los criterios ni en los parámetros que deben ser tomados en cuenta. El mismo indicador puede significar cosas diferentes de una ciudad a otra o de un periodo a otro. El resultado es un sistema incompleto y poco confiable.

Al contrario de la atención a la infraestructura, que está orientada a aumentar la oferta, la gestión se dirige a la administración de la demanda. Por medio de la medición, el cobro y las sanciones al no pago, la administración comercial tiene un impacto significativo en la cantidad de agua que consumen los usuarios del servicio.

El análisis de la gestión urbana del agua que realizan los OOAPAS en México se puede hacer observando el control físico (o pérdidas) del agua y la administración comercial del servicio. El control físico tiene que ver con la red de distribución y el estado que guarda la tubería; su objetivo es reducir al mínimo la pérdida de agua en el proceso de distribución y traslado a los consumidores. Por ello, su principal indicador es la proporción de agua que se pierde en el proceso de distribución urbana y que se conoce técnicamente como "agua no contabilizada". Por otra parte, la administración comercial del servicio tiene que ver básicamente con lo relacionado con el cobro por el servicio de agua a los usuarios. Esta administración comercial en la mayoría de los casos comprende la medición del consumo de cada usuario, (denominada también micromedición); lectura y registro de los consumos; tarifa de agua; cobro efectivo del consumo, y sanción a quienes no pagan el servicio facturado. En el siguiente apartado se hace una revisión del estado que guarda cada uno de estos indicadores de gestión.

Indicadores de gestión del agua en México

La gestión es el elemento crítico para mitigar el impacto de la sequía en las ciudades, pero requiere de un sistema de información. La información es un requisito clave para la gestión adaptativa del agua. Esta información es el resultado de la medición de cada uno de los pasos claves en el abasto, distribución, uso y consumo, y cobro del ciclo urbano de gestión del agua. Para que dicha información sea útil, se requiere que sea válida, sistemática y confiable. Además, dicha información debe procesarse y analizarse, a fin de que sea útil para la toma de decisiones. Este proceso generalmente implica la construcción de indicadores. En conjunto, dicho sistema de información e indicadores constituye un tablero de control que permite ver los comportamientos del abasto, el control físico de pérdidas de agua y los patrones urbanos de

Cuadro 3. Impacto de la gestión urbana de agua en la sequía. Fuente: elaboración propia.

Componentes de la gestión	Indicadores de la gestión	Impacto en el suministro de agua
Control físico: - Acceso universal - Control de pérdidas	- Nivel de cobertura - Agua no contabilizada	- Debe ser accesible a toda la población - Minimizar las pérdidas físicas de agua en la distribución y eficiencia de la red de distribución
Administración comercial: - Medición de consumos - Tarifa de agua - Cobro de consumo volumétrico	- Porcentaje de medición - Tarifa - Facturación - Cobro efectivo - Recuperación de costos - Sustentabilidad financiera	- Consumo racional y moderado por la medición, tarifa y cobro - Minimizar las pérdidas (derroche) del consumo - Despolitización, autonomía y profesionalización del servicio
- Participación social	- Cultura del agua (patrones de consumo)	- Orientación al cliente/ciudadano

ISSN 2007-2422

consumo. Sin este tablero de control, los OOAPAS estarán administrando a ciegas el agua.

En México, la construcción de sistemas de información que sirvan a los OOAPAS para emprender la gestión adaptativa del agua, así como para hacer comparaciones del desempeño, está aún a medio camino. Si bien la Conagua ha hecho el esfuerzo de publicar desde 1989 el anuario titulado *La situación del subsector agua potable y alcantarillado* (Conagua, 2012b) con información e indicadores sobre la gestión urbana del agua, dicha información presenta serias limitaciones, pues no se reportan todas las ciudades y muchas no aparecen de forma consistente en estos reportes. Por otro lado, no todos los indicadores son reportados para cada ciudad. De hecho, hay algunas urbes, como por ejemplo Toluca, sobre las que no se ha publicado información en este anuario. Por ello, este reporte incluye sólo una muestra de ciudades que cuentan con información, y se puede inferir que son las que tienen un sistema de información más desarrollado, mientras que las urbes sin información muy probablemente tienen niveles de desempeño aún menos presentables (Pineda-Pablos & Salazar-Adams, 2008). Existen además esfuerzos de recopilación de información de indicadores de gestión de los OOAPAS, pero éstos son aún más limitados que los de la Conagua (Lutz, Salazar-Adams, Montiel, & Haro, 2013).

En este apartado se revisan algunos indicadores de gestión urbana del agua en México que permiten identificar las deficiencias de información que incrementan la vulnerabilidad de las ciudades ante la sequía y constituyen obstáculos ante la necesidad de reducción de consumos para mitigar el impacto de la sequía.

1. *Control de pérdidas*. ¿Cuánta agua se está perdiendo en las redes de las ciudades? Es imposible saberlo a ciencia cierta debido a las dificultades que impone la carencia de micromedición en muchos OOAPAS. Sin embargo, se puede hacer una aproximación al problema a través de la recopilación de información de una muestra de OOAPAS que publica anualmente la Conagua y que, al no ser una muestra representativa, no necesariamente corresponde al promedio nacional. Sin embargo, resulta útil para hacer una aproximación a la situación de los OOAPAS urbanos sobre este aspecto crítico de la gestión.

El indicador de eficiencia física se obtiene como el cociente del volumen de agua facturada entre el volumen de agua producida (Conagua, 2012a):

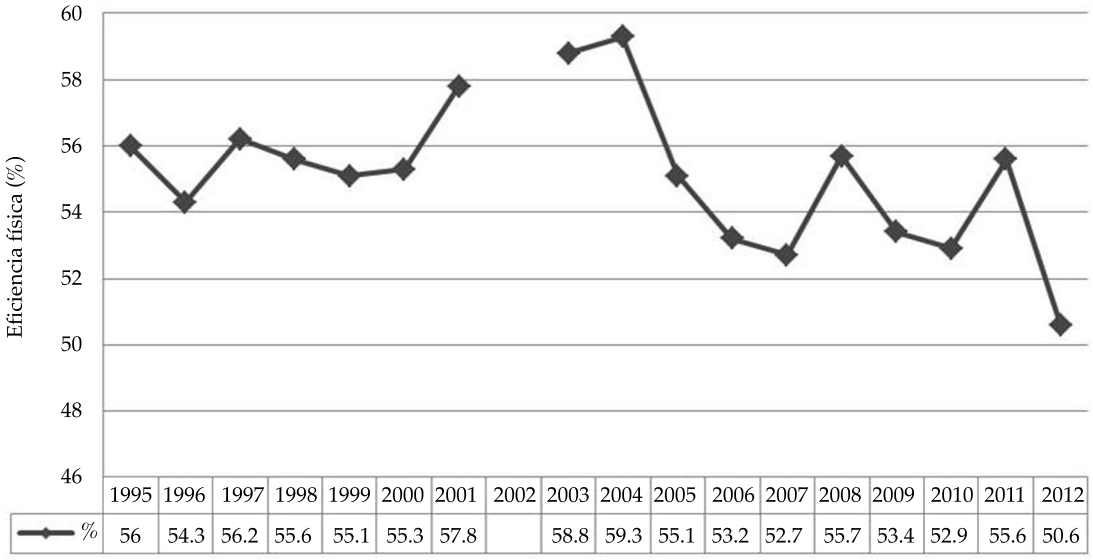
$$\text{Eficiencia física} = \frac{\text{Volumen facturado}}{\text{Volumen producido}} \times 100$$

Durante las dos últimas décadas, con base en los indicadores publicados por Conagua entre 1995 y 2012 para localidades con más de 50 mil habitantes, se observa que la media de este indicador no ha tenido mucha variación a lo largo del tiempo, situándose entre 59.3 y 50.6%. Esto significa que, en promedio, casi la mitad del agua que se produce en estos organismos es "agua no contabilizada"; es decir, se pierde por fugas, se consume a través de tomas clandestinas, se consume en tomas que no se miden, o no se registra por errores de medición debido a deficiencias administrativas o de los equipos de medición instalados (figura 5).

Las ciudades de México enfrentan el reto de manejar de forma más adecuada el agua que se consume y hacer más eficientes sus sistemas para reducir la vulnerabilidad, pero para ello deben comenzar por medir los consumos, a fin de poder evaluar el uso del agua e incentivar el ahorro entre los usuarios. Después deben revisar sus tarifas y esquemas de cobranza, con el objeto de incidir en el consumo y obtener recursos para la operación del sistema.

2. *Medición del consumo*. Para poder administrar la demanda se requiere que se midan los consumos de agua. Estudios anteriores señalan que la existencia de medición reduce el consumo de agua entre 20 y 30% (Zetland, 2014). En la ciudad de Boulder, Colorado, EUA, se observó una reducción

• ISSN 2007-2422



	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
%	56	54.3	56.2	55.6	55.1	55.3	57.8		58.8	59.3	55.1	53.2	52.7	55.7	53.4	52.9	55.6	50.6

Figura 5. Promedio de eficiencia física en organismos urbanos de agua 1995-2012. Fuente: Conagua, 2012a.

de 36% después de introducir la medición de las tomas (Hanke, 1970). Reducciones similares se reportan también en el estado de California (Pacific Institute, 2014; Tanverakul & Lee, 2013; Maddaus, 2001). En este caso, el porcentaje de micromedición se refiere a la proporción de tomas que cuentan con medidor con respecto al total de tomas administradas por un organismo de agua, y se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Porcentaje de macromedición} = \frac{\text{Conexiones que tienen medidor}}{\text{Número total de conexiones}} \times 100$$

La muestra de ciudades de más de 50 000 habitantes reportada por la Conagua apunta que la micromedición en el país no ha mejorado en más de una década y el comportamiento de la medición es diferenciado entre los tipos de usuario. En 2012, el sector con menor medición era el doméstico, siendo que es el mayor consumidor para el caso de usos urbanos. El indicador reportó que 64% de las tomas de este sector tenía medidor, pero sólo 54% del total tenía un medidor funcionando (cuadro 4).

Los datos reportados muestran que los usuarios comerciales e industriales tenían una cobertura de medición de 73 y 87%, respectivamente, pero ésta se reducía a 62 y 78% si sólo se consideran los medidores funcionales. Sin embargo, en las tomas domésticas, la proporción de medición se reduce a 64% con medidor y a 53%, en promedio, de tomas con medidor que funciona. Cabe resaltar que el hecho de que las tomas cuenten con medidor funcionando no necesariamente implica que los consumos sean leídos, registrados, facturados y cobrados. Esto señala que el nivel de medición es bastante bajo en las ciudades mexicanas y no hay información confiable sobre los consumos de agua.

3. *Tarifas y precio promedio*. Una vez medidos los consumos, es necesario contar con tarifas que reflejen de manera efectiva la escasez del agua. Tarifas adecuadas incentivan a los hogares a utilizar menos agua y reparar las fugas al interior de los domicilios, y a la industria y los comercios a mejorar sus procesos y adaptar dispositivos de ahorro.

ISSN 2007-2422

Cuadro 4. Porcentaje de tomas con medidor 2004-2012. Fuente: Conagua, 2012b.

Año	Tomas domésticas		Tomas comerciales		Tomas industriales	
	Instaladas	Funcionando	Instaladas	Funcionando	Instaladas	Funcionando
2004	69	60	79	70	88	80
2005	71	62	82	72	90	81
2006	66	60	76	69	85	79
2007	65	52	76	63	84	72
2008	60	46	70	55	79	65
2009	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
2010	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
2011	61	51	78	60	86	77
2012	64	53	73	62	87	78

Cuadro 5. Precio promedio del metro cúbico de agua 2005-2008. Fuente: Conagua 2012b.

Año	Precio promedio en pesos corrientes	Precio promedio en pesos constantes (base 2010 = 100)
2005	5.98	7.43
2006	6.31	7.57
2007	6.17	7.11
2008	6.52	7.16

El *precio promedio* señala la cantidad promedio en pesos en que se vende cada metro cúbico consumido. Este indicador se obtiene dividiendo la recaudación total entre el volumen total recaudado.

Según datos de una muestra de ciudades, entre 2005 y 2008, el precio promedio aumentó en precios corrientes, pero no en pesos constantes. La falta de ajuste de las tarifas con respecto a la inflación estaría entonces desincentivando el ahorro de agua entre los usuarios.

4. *Cobranza efectiva*. Medición y tarifas son importantes, pero no influirán sobre el comportamiento de los consumidores si no se lleva a cabo el cobro por el servicio. La eficiencia comercial se define como la proporción del volumen de agua recaudado entre el volumen facturado:

$$\text{Eficiencia comercial} = \frac{\text{Volumen recaudado}}{\text{Volumen facturado}} \times 100$$

Este indicador permite evaluar la capacidad de un organismo para recaudar el pago de los usuarios por el servicio que se les provee. Puede observarse en la figura 6 que este indicador se ha mantenido en el periodo de 2004 a 2012 entre 68.8 y 77.3%.

La baja cobranza no incentiva el ahorro de agua por parte del usuario, lo cual genera un incremento en los costos del organismo y un deterioro de los recursos hídricos de los que se abastece, generando una situación de vulnerabilidad de las ciudades ante la sequía. Además, los OOAPAS necesitan contar con recursos para llevar a cabo las inversiones necesarias para reducir la vulnerabilidad, pero la baja cobranza impone restricciones en este aspecto.

Existen otros indicadores que se deben tomar en cuenta en la gestión adaptativa del agua, como el porcentaje de tratamiento y reúso de aguas residuales urbanas, pero por falta de espacio prescindimos aquí de ellos, pues con los indicadores señalados se tiene una buena

• ISSN 2007-2422

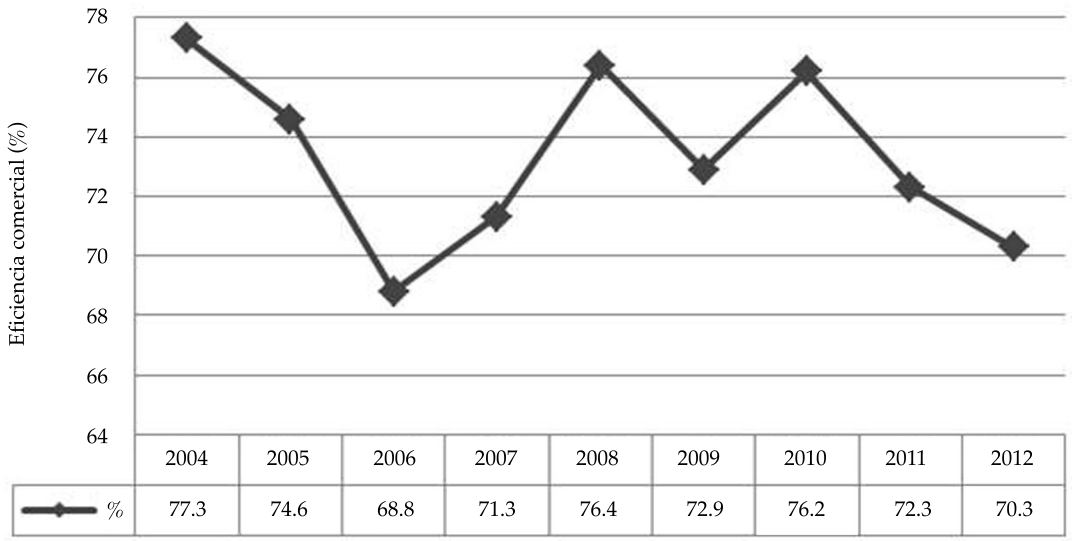


Figura 6. Eficiencia comercial 2004-2012. Fuente: Conagua (2012b).

aproximación a la situación de la gestión urbana del agua en México y las deficiencias de información que existen para adoptar políticas de medición de la sequía.

Patrones de consumo

Por último, como parte del modelo de análisis del impacto de la sequía en las ciudades, están los patrones de consumo. El propósito de la gestión es precisamente administrar e influir en los patrones de consumo de la ciudad. Los patrones de consumo se refieren a la cantidad de agua a que tienen acceso los usuarios y las características que adquiere dicho consumo, como si se utiliza para el consumo humano directo (en vez de recurrir a la compra de agua embotellada), o si sólo se emplea en el aseo personal y las tareas de limpieza de los hogares, así como en el riego de jardines. El elemento esencial es qué tanto se consume y si se toman en cuenta las condiciones de sequía y del medio ambiente en los patrones de consumo. El indicador clave es el consumo per cápita. En el ámbito internacional, este consumo varía mucho de un país a otro, y de una ciudad a otra. En México se ha manejado que el volumen necesario de agua es de alrededor de 150 litros por persona por día (Hernández-Garcíadiego, 2015). Sin embargo, la dotación por persona por día muestra gran variación y puede ir, por ejemplo, desde 135 litros en Naucalpan hasta 415 litros en Chihuahua (Torregrosa, 2015).

Asimismo, en los patrones de consumo se puede considerar también la calidad del servicio que reciben los usuarios. Esta calidad incluye principalmente la accesibilidad o cobertura del servicio de agua a todos los habitantes de la ciudad o demarcación; así como la continuidad, confiabilidad, presión, y potabilidad o calidad químico biológica del agua para consumo humano. En general, el servicio urbano de agua de calidad incluye un suministro constante de agua 24 horas diarias, siete días de la semana, que no tenga suspensiones o cortes inesperados durante el año; con presión suficiente para que suba a la regadera y permita ducharse sin contratiempos y, en el mejor de los casos, que el agua sea efectivamente potable (es decir, apta para consumo humano, que cumpla con los parámetros de la norma oficial mexicana), y sea agradable al gusto (sin olor, color o sabor). Ésta

es la parte en lo que se refiere a la prestación del servicio por parte del OOAPAS.

Por otro lado, parte concomitante del patrón de consumo es también el buen uso y consumo que el ciudadano hace del agua y lo que se denomina en México "cultura del agua" (Conagua, 2014). Esto implica principalmente que el usuario o consumidor no incurra en su desperdicio, y fomente su reúso y conservación.

De este modo, los OOAPAS deberán asegurarse que todos tengan acceso a agua suficiente para sus necesidades básicas; en cuanto al usuario, también se espera que reduzca y modere dichos consumos, a fin de ajustarse y adaptarse a los requerimientos del entorno, ya sea de sequía o reducción de la huella ecológica en la naturaleza, y preservación del medio ambiente. La capacidad adaptativa se entiende como un proceso dinámico basado en el aprendizaje social entre y dentro de los OOAPAS y sus comunidades, y no una mera condición estática o conjunto de atributos o resultados (Wilder *et al*., 2010). El servicio de agua de calidad implica entonces un delicado equilibrio entre el nivel que permite y apoya una vida humana digna y fomenta las actividades productivas, por un lado, y por otro adapta y reduce sus consumos al mínimo, a fin de que se adapte al medio ambiente, y se fomente la sustentabilidad.

Discusión

El impacto de la sequía sobre el servicio de agua para consumo humano es el resultado combinado del evento natural (menos lluvia que la esperada), así como de la intermediación que llevan a cabo tanto la infraestructura hidráulica como la gestión del consumo y, no menos importante, de los patrones de consumo y uso racional del recurso para satisfacer las necesidades y efectuar las actividades humanas. Como se ha mencionado, lo ideal sería que el impacto de la sequía fuera nulo, sin embargo esta meta presenta limitaciones de dos tipos: uno, la información necesaria para determinar la magnitud y el momento de ocurrencia del impacto; dos, los recursos necesarios para contrarrestar el impacto. Dadas las limitaciones de información, el problema adquiere un carácter de gestión de riesgo, pues si bien no se puede predecir la ocurrencia de la sequía ni de los efectos, el estudio de los datos meteorológicos disponibles sobre episodios anteriores puede servir para aproximar la probabilidad de ocurrencia.

Asimismo, los datos existentes (en caso de que los haya) sobre los impactos de sequías previas pueden utilizarse para estimar el costo (magnitud) de los impactos previamente ocurridos, que junto con la distribución de probabilidad permitiría obtener un valor esperado del impacto, que teóricamente podría cubrirse a través de un fondo o por medio de pago de primas de seguros. Esto hace más visible la importancia de los sistemas de información para la gestión de la sequía. Como se ha visto, existen grandes deficiencias en el registro y manejo de la información de los OOAPAS, las cuales repercuten a su vez en deficiencias en el manejo de la demanda y gestión financiera de los sistemas de agua potable, y provocan que el posible impacto de las sequías sea aún más costoso para las ciudades y no se cuente con los recursos para hacer frente a estos eventos.

Conclusiones

Una vez revisado el modelo de impacto de la sequía en las ciudades y el papel crítico que tiene la información en México, se tratará de dar respuesta resumida a las preguntas planteadas al inicio de este trabajo.

¿Cómo se da el impacto de las sequías en los servicios urbanos de agua? De acuerdo con el modelo propuesto, el impacto de la sequía en los servicios urbanos de agua no es directo ni inmediato, sino que está mediado por la infraestructura hidráulica existente y por la gestión de los patrones de consumo por medio del control de pérdidas, medición de los consumos, tarifa o precio, y cobro efectivo del agua. En este impacto, la infraestructura juega un papel de almacenamiento y sirve para demorar o retrasar los impactos. La gestión, por su parte,

es el elemento crítico para adaptar el consumo o demanda al nivel de disponibilidad que presenta la sequía.

¿Qué tipo de respuesta deben dar los organismos operadores de agua potable, alcantarillado y saneamiento? Tradicionalmente en México se ha prestado más atención a la infraestructura y a lo que denominamos el enfoque de oferta. Esto obedece a que infraestructura y derechos de agua tienen un marco institucional centralizado en el gobierno federal (que tiene mayor capacidad técnica y financiera), y a que para los organismos operadores, la construcción de infraestructura se resuelve más fácilmente con apoyos de programas federales y representa un activo político más redituable en los breves periodos de la gestión local del agua. Sin embargo, es la gestión de la demanda la respuesta que deben dar los OOAPAS, a fin de mitigar la sequía de manera más efectiva. La gestión adaptativa del agua requiere que la demanda o consumo de agua se reduzca, a fin de compensar la baja en la disponibilidad que presenta la sequía meteorológica. Esta gestión adaptativa se realiza principalmente por medio del control de pérdidas, medición de los consumos, precio o tarifa, y cobro efectivo. Este tipo de medidas, si bien requieren de una mayor inversión de tiempo y trabajo humano del personal, así como de mayor planeación y continuidad de las políticas, significa un costo significativamente menor no sólo financiero, sino también ambiental y de conflicto social, que el que requieren las nuevas obras de infraestructura y de aumento del abasto de agua.

¿Cuál es el principal obstáculo para enfrentar y mitigar los efectos de la sequía en las ciudades mexicanas? El principal obstáculo para que los OOAPAS enfrenten y mitiguen la sequía es la carencia de un sistema de información y de seguimiento de indicadores de pérdidas de agua, medición de consumos, tarifas recuperadoras de costos y cobro efectivo del servicio. Una proporción importante de OOAPAS no cuenta con control de pérdidas, ni con micromedición del consumo, ni con cobro efectivo de los servicios. Avanzar en la información y mejoramiento de estas áreas de oportunidad constituye el nodo crítico para que las ciudades enfrenten de manera más efectiva y sustentable las sequías recurrentes. A este tipo de gestión se le puede denominar gestión adaptativa del agua.

En suma, en México, los OOAPAS tienden a favorecer la estrategia de oferta de infraestructura y aumento de abasto de agua, más que el recurso a la gestión adaptativa de la demanda y el consumo. Esta tendencia se explica principalmente porque los OOAPAS carecen de la información requerida para llevar a cabo la gestión adaptativa de los servicios de agua y, en cambio, tienen mayores incentivos financieros y políticos para la construcción de infraestructura. Para que las ciudades mitiguen de manera efectiva los efectos de la sequía, se requiere que los OOAPAS mejoren su capacidad institucional y de manejo de información, a fin de que puedan desarrollar la gestión adaptativa de los servicios urbanos de agua.

Agradecimientos

Este trabajo es resultado de un proyecto de investigación financiado por la Lloyd's Register Foundation, fundación benéfica que ayuda a proteger la vida y propiedad a través de la educación relacionada con la ingeniería, participación pública e investigación aplicada. Para más información véase www.lrfoundation.org.uk; con apoyo del Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI) CRN3056, que es apoyado por la US National Science Foundation (Subvención GEO-1128040) y por IAI SGP-CRA #005 (Subvención Núm. GEO-1138881); así como con apoyo del Conacyt, a través del proyecto CB-2013/223780 titulado "Vulnerabilidad hídrica y formulación de políticas adaptativas para la sustentabilidad urbana y la gestión por cuencas en la región del Golfo de California".

Referencias

Carabias, J., & Landa, R. (2005). *Agua, medio ambiente y sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México.* México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México, El Colegio de México, Fundación Gonzalo Arronte.

Conagua (2011). *Agenda del Agua 2030.* México, DF: Conagua. Recuperado de http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Temas/AgendadelAgua2030.pdf.

Conagua (2012a). *Manual de incremento de eficiencia física, hidráulica y energética en sistemas de agua potable.* México, DF: Comisión Nacional del Agua.

Conagua (2012b). *Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento.* México, DF: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Conagua (4 de noviembre de 2014). *Programa de Cultura del Agua*. Recuperado de http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=6&n2=200&n3=200.

DOF (22 de noviembre de 2012). Lineamientos que establecen los criterios y mecanismos para emitir acuerdos de carácter general en situaciones de emergencia por la ocurrencia de sequía, así como las medidas preventivas y de mitigación, que podrán implementar los usuarios de las aguas nacionales para lograr un uso eficiente del agua durante sequía (pp. 90-95). *Diario Oficial de la Federación*.

Estrela-Monreal, T. (2006). Gestión de sequías en España. *Ingeniería y Territorio, 74*, 52-57.

Hanke, S. (1970). Demand for Water Under Dynamic Conditions. *Water Resources Research*, *6*(5), 1253-1261.

Harvey, D. (1996). *Justice, Nature and the Geography of Difference*. Oxford: Blackwell.

Hernández-Garcíadiego, R. (2015). Favorecer el ciclo hidrológico en el siglo XXI. *H2O Gestión del Agua*, *4*, 26-31.

Jardines-Moreno, J. L. (2008). La infraestructura hidráulica municipal y la participación en su creación y operación de los gobiernos federal y estatal (pp. 89-109). En: *El agua potable en México. Historia reciente, actores, procesos y propuestas*. Olivares, R., & Sandoval, R. (eds.). México, DF: Asociación Nacional de Empresas de Agua y Saneamiento de México.

Kaica, M. (2005). *City of Flows. Modernity, Nature and the City.* New York: Routledge.

Karamouz, M., Moridi, A., & Nazif, S. (2010). *Urban Water Engineering and Management*. Boca Ratón, USA: CRC Press.

Lutz, A. N., Salazar-Adams, A., Montiel, A., & Haro, N. (2013). *Base de datos. Agua potable en México.* Hermosillo, México: El Colegio de Sonora.

Maddaus, L. (2001). *Effects of Metering on Residential Water Demand for Davis, California* . Sacramento, USA: Brown and Caldwell.

Marcos-Valiente, O. (julio de 2001). Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones geográficas*, *26*, 59-80.

Marsalek, J., Jiménez-Cisneros, B., Karamouz, M., Per-Arne, M., Goldenfum, J., & Chocat, B. (2008). *Urban Water Cycle Processes & Interactions.* (U. &. IHP, Ed.) Paris: Taylor & Francis.

Moreno-Vázquez, J. L., Marañón-Pimentel, B., & López-Córdova, D. (2010). Los acuíferos sobreexplotados: origen, crisis y gestión social (pp. 79-115). En: *El agua en México: cauces y encauces*. Jiménez-Cisneros, B., Torregrosa y Armentia, M., & Aboites-Aguilar, L. (eds.). México, DF: Academia Mexicana de Ciencias.

National Drought Mitigation Center (24 de junio de 2015). *What is Dought?* National Drougth Mitigation Center. Recovered from http://drought.unl.edu/

National Geographic (julio de 2015). *Droughts 101*. Obtenido de Nat Geo 101. Recuperado de http://video.nationalgeographic.com/video/101-videos/droughts.

OMM (2015). *Integrated Drought Management Program.* Organización Meteorológica Mundial. Recuperado el 24 de junio de 2015, de Concept Note: http://www.idmp.info/documents/IDMP_Concept_Note.pdf.

Ostrom, E. (2007). Institutional Rational Choice. An Assessment of the Institutional Analysis and Development Framework (pp. 21-64). En: *Theories of the Policy Process* Sabatier, P. A. (ed.). Cambridge, USA: Westview Press.

Pacific Institute (2014). *Metering in California*. Recuperado de http://pacinst.org/wp-content/uploads/sites/21/2014/09/pacinst-metering-in-california.pdf.

Pineda-Pablos, N., & Salazar-Adams, A. (2008). De las juntas federales a las empresas de agua: la evolución institucional de los servicios urbanos de agua en México 1948-2008 (pp. 55-75). En: *El agua potable en México. Historia reciente, actores, procesos y propuestas* Olivares, R., & Sandoval, R. México, DF: Asociación Nacional de Empresas de Agua y Saneamiento de México.

Pineda-Pablos, N., Salazar-Adams, A., & Buenfil-Rodríguez, M. (2010). Para dar de beber a las ciudades mexicanas: el reto de la gestión eficiente del agua ante el crecimiento urbano (pp. 117-140). En: *El agua en México: cauces y encauces*. Jiménez-Cisneros, B., Torregrosa y Armentia, M., &, Aboites- Aguilar, L. (eds.). México, DF: Academia Mexicana de Ciencias.

SMN (2010). *Climatología: monitor de sequía.* México, DF: Servicio Metereológico Nacional. Recuperado en agosto de 2014 de http://smn.cna.gob.mx/.

SMN (30 de julio de 2015). Comunicación personal. México, DF: Servicio Metereológico Nacional.

Tanverakul, S. A., & Lee, J. (2013). Residential Water Demand Analysis Due to Water Meter Installation in California (pp. 936-945). In: *World Environmental and Water Resources Congress 2013: Showcasing the Future.* California: American Society of Civil Engineers.

Torregrosa, M. L. (2015). Urban Water in Mexico (pp. 384-411). En: *Urban Water Challenges in the Americas*. IN Sciences. México, DF: IANAS.

Wester, P., Rap, E., & Vargas-Velázquez, S. (2009). The Hydraulica Mission and the Mexican Hydrocracy: Regulating and Reforming the Flows of Water and Power. *Water Alternatives*, 2(3), 395-415.

Wilder, M., Scott, C. A., Pineda-Pablos, N., Varady, R., Garfin, G. M., & McEvoy, J. (2010). Adapting Across Boundaries: Climate Change, Social Learning, and Resilience in the US–Mexico Border Region. *Annals of the Association of American Geographers*, *100*(4), 917-928.

Zetland, D. (2014). *Living with Water Scarcity.* Amsterdam: Aguanomics Press.

Dirección institucional de los autores

Dr. Nicolás Pineda Pablos
Dr. Alejandro Salazar Adams

El Colegio de Sonora
Centro de Estudios en Gobierno y Asuntos Públicos
Ave. Obregón 54, Centro
83000 Hermosillo, Sonora, México
Teléfono: +52 (662) 2595 300, extensiones 2246 y 2287
npineda@colson.edu.mx
asalazar@colson.edu.mx

Haga clic aquí para escribir al autor

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 95-113
ISSN 2007-2422

Sequía en Durango, México.

Foto: Oscar Alonso Barrón.

Considerations for a Research Program on Drought in Mexico

• Víctor Magaña* •
Universidad Nacional Autónoma de México
*Autor para correspondencia

Abstract

Magaña, V. (September-October, 2016). Considerations for a Research Program on Drought in Mexico. *Water Technology and Sciences* (in Spanish), *7*(5), 115-133.

The impacts of drought in Mexico have led water authorities to define a strategy for action to diminish their costs. But the proposed actions at regional levels require a solid scientific basis on the subject to answer several of the questions that decision makers have, not only on the dynamics of climate variability, but on the context that produces hydrological, agricultural and socioeconomic droughts. This work makes some considerations on the research topics and approach to be followed in the scientific Plan for the Program against Drought in Mexico (known as Pronacose), in a risk management context. This approach requires that, in addition to monitoring strategies and the study of processes and prediction on drought, vulnerability be characterized as a dynamic and multifactorial element within the analysis on risk to drought. This approach also requires the collaboration of stakeholders from various sectors and regions, in order to define structural and non-structural measures against drought, such as early warning systems.

Keywords: Drought risk, research program, early warning system.

Resumen

Magaña, V. (septiembre-octubre, 2016). Consideraciones para un programa de investigación de la sequía en México. Tecnología y Ciencias del Agua, *7(5), 115-133.*

Los impactos de la sequía en México han llevado a las autoridades del agua a definir una estrategia de acción para reducir sus costos. Pero las acciones propuestas a nivel regional requieren una sólida base científica sobre el tema, a fin de responder a varias de las preguntas que los tomadores de decisiones tienen, no sólo sobre la dinámica de la variabilidad del clima, sino también en cuanto al contexto en que se producen las sequías hidrológicas, agrícolas y socioeconómicos. Este trabajo hace algunas consideraciones sobre los temas de investigación sobre sequía, sus impactos y la forma de abordarlos como parte del Plan Científico para el Programa Nacional contra la Sequía de México (conocido como Pronacose), en un contexto de gestión de riesgo. Este enfoque requiere que, además de la definición de estrategias de monitoreo, estudio de los procesos y predicción de la sequía meteorológica, la vulnerabilidad a esta condición sea caracterizada como un elemento dinámico y multifactorial. El enfoque de riesgo ante sequía necesita además de la participación de actores clave de diversos sectores de las regiones, con el fin de definir de manera conjunta las medidas estructurales y no estructurales para reducir los impactos de la sequía, como son los sistemas de alerta temprana.

***Palabras clave**: riesgo de sequía, programa de investigación, sistema de alerta temprana.*

Received: 13/08/2015
Accepted: 01/13/2016

Introduction

a) Drought Risk Analysis

Human activities and ecosystems health depend on adequate and reliable sources of water. Consequently, a meteorological drought, identified as periods of insufficient water initiated by reduced precipitation for a prolonged time (WMO, 2006), represents a natural hazard (Wilhite, 2000). There is great concern about such climatic condition since its socio-economic costs have substantially grown in recent decades (Wilhite, Sivakumar, & Pulwarty, 2014). Depending on the vulnerability context, an anomalously prolonged precipitation deficit may result in hydrological, agricultural or

socioeconomic droughts. Therefore, it is important to construct programs to prevent, or at least to reduce, the negative impacts of drought by defining risk management strategies. This is one of the reasons why some United Nations agencies, such as the World Meteorological Organization (WMO) or the Food and Agriculture Organization (FAO), promote science-based actions to examine the key drought vulnerabilities, in order to define strategies to prevent or at least reduce the magnitude of drought impacts. This suggestion shows that nowadays prevention is more relevant than disaster recovery.

Water agencies around the world are improving their water management capacity in order to manage prolonged periods of water shortage resulting from drought. The ultimate goal of this effort is to create drought resilient societies and ensure food security and sustainability of natural systems (Wilhite *et al*., 2014). But this cannot be an isolated effort. "Countries need to work together to use their experiences, science and technologies to create formal national preventive policies against droughts" (United Nations, 2013). The recent prolonged meteorological droughts in northern Mexico (2010-2012), California (2012-2015) or Brazil (2014-2015) for instance, have placed a number of questions about this phenomenon that need to be addressed by the scientific community to better define water management practices under prolonged drought conditions. Various research international programs have developed in order to share knowledge and experience on how to prepare for such climatic phenomenon (*e.g*., WCRP, 2011). Similarities and contrasts among drought events and impacts around the world may lead to better prevention programs in a context of a global water crisis (Oelkers, Hering, & Zhu, 2011). A better understanding on the mechanisms that force prolonged meteorological droughts is necessary, along with adequate characterizations of the factors that make a region or sector vulnerable to this climatic condition. This is one of the reasons why research programs on drought are international, multidisciplinary and crosswise, and with a strong component of applications on uses of climate information by sector (WCRP, 2011).

Droughts and water shortages significantly affect the lives of millions in Mexico and around the world, particularly in the agriculture, cattle ranching and hydropower generation sectors. At times, droughts also have an impact in major urban or tourism centers. The social, economical and environmental costs of the recent severe drought in northern Mexico (Rodríguez & Juárez, 2011) have led to consider public policies to reduce the impacts. The National Water Commission (known as Conagua) has developed an increased interest in understanding severe meteorological droughts to define responses to reduce the consequences. But defining what a severe drought is, or what a critical period of precipitation deficit in time is, requires a continuous monitoring of climatic conditions, as well as the characterization of the drought vulnerability context. Until recently, vulnerability was an aspect of risk that was seldom included in most analyses of hydrological, agricultural or socioeconomic droughts in Mexico (Neri & Magaña, 2016). Some qualitative descriptions of vulnerability to drought were developed but not validated (*e.g*., Conagua 2014). It is unknown if they actually explain the impacts of drought in recent years. Therefore, a risk to drought model requires a quantification of vulnerability and validation of the vulnerability model in order to identify the main factors that increase the risks of hydrological or agricultural drought (Neri & Magaña, 2016).

Several studies examine meteorological drought in Mexico, documenting episodes of precipitation deficit at regional level (Magaña, 1999; Hernández, Carrasco, & Alfaro, 2007; Escalante-Sandoval & Reyes-Chávez, 2012; Márdero *et al*., 2012; Vilches-Francés, Díaz-Delgado, & Bâ, 2014) or the climate dynamic processes that result in drought (Seager *et al*., 2009; Méndez & Magaña, 2010). On the other hand, agricultural drought has been mainly analyzed in terms of its impacts (Bellon *et al*., 2004), or in terms of options to tackle it (Acosta *et al*., 1999). However, it is necessary to develop studies to

• ISSN 2007-2422

understand how droughts affect different types of agro-ecosystems, coupling climate information and the responses of vegetation. Numerous studies document the history of drought impacts, using approaches based on proxies, such as dendrochronology (Villanueva-Díaz *et al*., 2014), or historical documents (Endfield & O´Hara, 1999; Liverman, 1999; Garza, 2002; García-Acosta, Pérez, & Molina, 2003; Contreras, 2005). Some others discuss the costs of drought in the agricultural or cattle ranching sectors in Mexico (*e.g*., Ortega-Ochoa, Villalobos, Martínez-Nevárez, Britton, & Sosebee, 2008; Eakin, 2007). But they rarely refer to vulnerability in a multifactorial and dynamic manner.

The scientific literature on the hydrological drought in Mexico is also abundant, with reference to the problems on water management under water stress conditions and precipitation deficit in various regions (Pereyra & Sánchez, 1995; Mendoza *et al*., 2005; Ortega-Gaucin, 2012). They basically document changes in streamflow, water reservoir levels or soil moisture deficit, considering these are direct impacts of meteorological droughts, in a sort of natural paradigm perspective (Stallings, 2003). Bout some hydrological droughts may occur even without a meteorological drought, depending on the water management practices. Finally, there are numerous aspects of the socioeconomic drought that also need to be addressed in a risk analysis context, in such a way that results may be used to improve policies and actions to reduce the impacts of drought in Mexico for instance, at the urban level.

The National Program against Drought, known as Pronacose, was developed in 2012 and aims at inhibiting or reducing the impacts of drought by means of preventive actions. In particular, the Program on Preventive Measures and Drought Impact Mitigation, known as PMPMS, is a component of Pronacose whose goal is to implement specific measures to reduce the impacts of meteorological drought, based on adequate drought information on the hazard and the vulnerability at the sub-basin level. At present, the characteristics of the actions depend on the severity of the meteorological drought according to the scale presented in the North American Drought Monitor (Table 1). However, a more adequate measure of hydrological and agricultural droughts in it has not been adjusted to correspond to actual impacts in Mexico. The PMPMS requires better estimates of risk in order to define when and what actions should be implemented to efficiently prevent or reduce the magnitude of drought related disasters. The need for such risk estimates has led to a number of scientific questions about droughts and their impacts in various regions and socioeconomic sectors of Mexico. It is necessary to define a Drought Research Program in order to address scientific issues about monitoring, processes and prediction, drought risk analysis and management, and communication. Therefore, a scientific research plan on drought for Mexico is required, that addresses the scientific issues on meteorological drought but also, that examines the causes of hydrological, agricultural and socioeconomic droughts in order to present relevant information to decision makers in Mexico.

b) Objective

The objective of this work is to propose some elements for a Scientific Research Plan on Drought for Mexico, which serve to generate knowledge on key aspects of this climatic conditions and its impacts that allow implementing basic actions of the Pronacose-PMPMS program. The emphasis of the Scientific Plan is on the need to better understand the physical and dynamical processes of climate variability that lead to drought, on the schemes for improved seasonal predictions of meteorological droughts in Mexico, as well as on ways to quantify the vulnerability to drought factors that result in risk of hydrological, agricultural and socioeconomic droughts. The identification of the vulnerability factors and risk to drought models will serve to better define preventive actions within Pronacose-PMPMS.

As in several countries with programs on drought risk management, the Drought

Table 1. Drought Severity Classification at National Drought Mitigation Center.

Range							
Category	**Description**	**Possible impacts**	**Palmer Drought Index**	**CPC Soil Moisture Model (percentiles)**	**USGS weekly streamflow (percentiles)**	**Standardized Precipitation Index (SPI)**	**Objective Short and Long Term Drought Indicator Blends (percentiles)**
D0	Abnormally dry	Going into Drought: Short term dryness slowing planting, growth of crops or pastures. Coming out of drought: some lingering water deficit; pastures and crops not fully recovered	-1 to -1.9	21 - 30	21-30	-0.5 to -0.7	21 - 30
D1	Moderate drought	Some damage to crops; streams, reservoirs or wells low, some water shortages developing or imminent; water-use restrictions request	-2.0 to -2.9	11 - 20	11 - 20	-0.8 to -1.2	11 - 20
D2	Severe drought	Crop or pasture losses likely; water shortages common; water restrictions imposed	-3.0 to -3.9	6-10	6-10	-1.3 to -1.5	6 - 10
D3	Extreme drought	Major crop/pasture losses; widespread water shortages or restrictions	-4.0 to -4.9	3 - 5	3 - 5	-1.6 to -1.9	3 - 5
D4	Exceptional drought	Exceptional and widespread crop/pasture losses; shortages of water in reservoirs, streams, and wells creating water emergencies	-5.0 or less	0 - 2	0 - 2	-2.0 or less	0 - 2

Research Plan for Mexico should start by defining the problems on the subject and the existing capacities for monitoring, understanding processes and prediction. Some of the scientific questions should be formulated to obtain multidisciplinary assessments, particularly with respect to the evaluation of drought vulnerability at the regional and sectorial level. The drought research strategy should be part of a more general scientific agenda to understand climate variability and climate change. Although progress has been made in the understanding some aspects of drought, it is still necessary to construct risk management and decision making schemes that motivate stakeholders to take actions that prevent or at least reduce some of the negative effects of droughts. Structural and non-structural measures based on drought risk analysis should lead to the development of early warning systems. In the end, the Drought Research Plan should make the Mexican society and its socioeconomic sectors more drought re-

• ISSN 2007-2422

silient with better water management strategies, in other words, drought research should be part of a more ambitious scientific plan on improved water management.

Drought research perspectives for Mexico

a) Drought Monitoring in a Risk Management Context

The study and management of drought have been constructed in terms of four basic lines of study: meteorological, hydrological, agricultural, and socioeconomic droughts (Wilhite & Glantz, 1985). The first one corresponds to a form of natural climate variability, but the last three approaches involve water management practices and consequently, include anthropic factors that should be taken into account. Therefore, the meteorological drought requires measuring physical parameters, but the other types of drought also require documenting social and economical elements (*e.g.*, Neri & Magaña, 2016).

In many parts of the world drought monitoring strategies are not limited to gather and displaying precipitation or temperature data, or to construct averages and anomalies in order to define the characteristics of a drought. Having the ability to monitor droughts is part of the climate variability operational analysis, a systematic procedure to promote timely actions to reduce the impacts of climatic anomalies. The monitoring of drought should include the manifestations of hydrological, agricultural and socioeconomic droughts, by measuring atmospheric, surface and subsurface parameters. In contrast to other meteorological hazards, droughts need to be characterized about their slow onset, evolution and demise, as well as their spatial extent and intensity.

Droughts are complex, large-scale phenomena involving air-sea and -land surface processes. In general, socio-ecosystems are resilient to short-term negative precipitation anomalies, but seasonal or prolonged droughts (more than a year duration) may turn into a socioeconomic and environmental crisis in countries that do not have adequate water management strategies. They are more noticeable in arid and semiarid regions of the world since limited water availability results in more frequent and prolonged periods of hydric stress. But meteorological droughts also occur in humid areas, where they may last from weeks to months (Dai, 2011). Droughts are not only related to water scarcity, but also to above-normal temperatures, which enhance soil moisture deficit. Although progress has been made on the understanding of the dynamics of meteorological droughts (Sheffield, Wood, & Roderick, 2012), there are numerous key unsolved issues that prevent water managers from defining more efficient water management policies for dry periods. These issues have to do with inadequate ways of characterizing, monitoring and forecasting meteorological drought and their impacts, in such a way that societies can move from drought disaster response to drought risk reduction.

Meteorological droughts are usually defined on the basis of the degree of dryness, in comparison to some "normal" or average amount, and the duration of the dry period. Definitions of meteorological drought should consider regional climatic conditions to define what is considered as anomalous. In regions like Mexico, prolonged droughts are at least a synoptic scale phenomenon that may be monitored by the current network of surface weather stations. The use of statistics in individual stations to represent "local droughts" may be considered inadequate since the existence of persistent negative anomalies in precipitation affect a larger extension than only a small location. This may not be the case when hydrological, agricultural or socioeconomic droughts are evaluated since vulnerability may be due to local factors, which in turn are determinant in the magnitude of the impacts of a drought.

Some of the most severe droughts of the twentieth century in the world, including the one in the 1930s known as the "Dust Bowl" drought in North America, have been explained

ISSN 2007-2422

in terms of natural factors and human induced forcing (*e.g.*, Cook, Miller, & Seager, 2009). But the analysis of the dynamics of drought and its impacts is based on the existence of adequate data to characterize its evolution by means, for instance of indicators. As part of the monitoring activities, keeping track of drought indices or parameters is a priority (Svoboda *et al*., 2002), in conjunction with adequate observations of large-scale conditions that are known to force drought (*e.g.*, sea surface temperature, soil and land use conditions, etc.). Analyses based on climatology, hydrology, and satellite-derived data are necessary to characterize the various elements of drought dynamics, its evolution and its impacts.

A reliable drought-monitoring scheme requires continuous precipitation and historical databases. The statistics used to define the intensity of a meteorological drought are related to the climate of the region under consideration. For instance, some definitions of meteorological drought identify dry periods on the basis of the number of days with precipitation less than some specified threshold. This measure is most appropriate for regions where precipitation occurs year round, such as a tropical rainforest, humid subtropical climate, or humid midlatitude climate. But meteorological drought in regions with a monsoonal climate, *i.e.*, with a well defined seasonal rainfall, and dry periods are better characterized by making reference to accumulated precipitation below a threshold value. In some regions, drought intensities and length may relate to actual precipitation anomalies with respect to average amounts on monthly, seasonal, or even longer time scales.

The use of modern techniques to obtain and assimilate climatic data from remote sensors is an important part of climate analysis. The monitoring of meteorological drought for Mexico may rely on the surface weather station network complemented with remotely sensed estimates of precipitation, temperature and atmospheric humidity, for instance. The use of data assimilation techniques becomes necessary to have gridded estimates of precipitation or other meteorological parameters, whose reliability may be evaluated. Satellite estimates have a relatively short history but in any event, they should be incorporated to complement in situ measurements. Producing frequent (*e.g.*, daily) precipitation fields from in situ and satellite data by means of algorithms constitutes a mean to monitor rainfall in regions where a single event, such as a tropical cyclone, may radically change the statistics of precipitation. For instance, Hurricane Alex in northeastern Mexico in late June 2010, made the first signals of the 2010-2012 meteorological drought in Mexico "blurred". Among the global precipitation estimates, data from the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) or the CPC Morphing Technique (CMORPH) (Joyce, Janowiak, Arkin, & Xie, 2004) have been used to generate high spatial and temporal resolution precipitation fields for Mexico (Magaña *et al*., 2012). The use of combined CMORPH and station data shows higher spatial coherence with impact data, as for instance the Normalized Difference Vegetation (NDVI) anomalies for August 2011 (Figure 1). The use of Conagua station precipitation data shows precipitation in regions where other sources of gridded precipitation data, such as the ERA-interim data indicate negative precipitation anomalies. For instance, in northwestern Mexico (Sonora and Chihuahua), ERA interim analysis indicate a dominant negative anomaly, contrary the positive precipitation anomalies obtained with the estimates with by rain gauge data and CMORPH estimates, and observed in the positive NDVI anomalies. Therefore, monitoring meteorological drought requires various sources of data. Temperature and atmospheric humidity data also provide information on the characteristics of meteorological drought, as well as other parameters such as surface pressure, wind and radiation.

One of the most widely used drought indices is the Palmer Drought Severity Index (PDSI) that describes intensity, duration, and spatial extent of an event (Palmer, 1965). The PDSI refers to anomalies in the supply and demand of water using monthly data of precipitation,

• ISSN 2007-2422

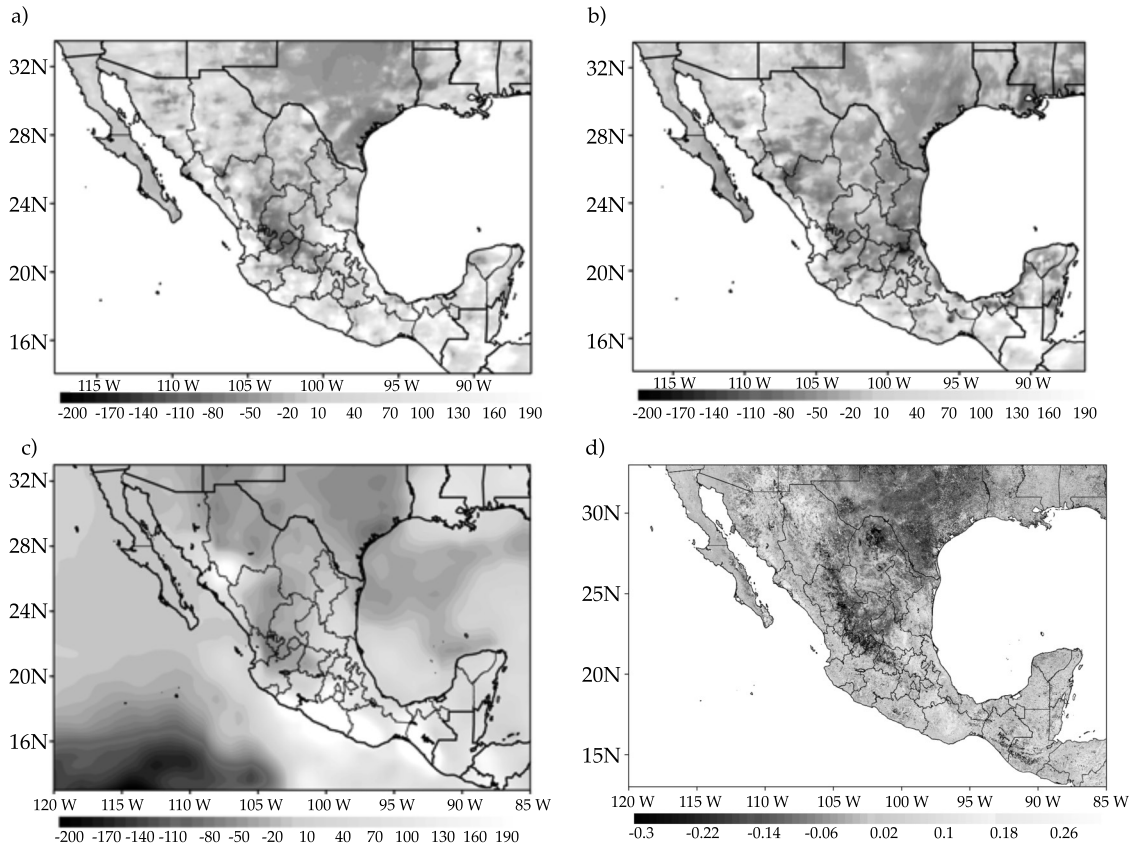


Figure 1. Monthly precipitation anomaly (mm), a) for July 2011 and b) August 2011 resulting from the combined data of the Conagua surface station network and CMORPH estimates. c) Monthly precipitation anomaly (mm) for July 2011 from the ERA-interim (ECMWF) data, and d) NDVI anomalies for August 2011.

temperature and soil moisture. However, the PDSI has mostly been used to characterize agricultural droughts (Hayes, Svoboda, Wilhite, & Vanyarkho, 1999), and not so frequently meteorological droughts. The PDSI limitations led to the development of the Standard Precipitation Index (SPI), based on precipitation data only (McKee, Doesken, & Kleist, 1995). The SPI is commonly used around the world to provided operational drought-monitoring information in near real-time (WMO, 2009). The SPI allows a relatively direct interpretation of short-term and long-term droughts but requires a long-term precipitation database. This is available for of Mexico and its calculation is easy to obtain by transforming the cumulative distribution function of precipitation into a normal distribution with a mean zero and standard deviation one. A precipitation total for a specified time period may be identified with a SPI value. Positive SPI values indicate greater than median precipitation, while negative values indicate less than median precipitation. The magnitude of departure from zero represents a probability of an accumulated precipitation in a time period. Given the probabilities in a normal distribution, an interpretation of the SPI is that values less than −1.0, -2.0 or -3.0 have probabilities of 16, 2.5 or 0.5%. The monitoring of drought (SPI) is nowadays given in terms of the SPI, but is usually complemented with reference to other measures.

ISSN 2007-2422 • *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 115-133

In Mexico, drought information makes reference to the North American Drought Monitor, that combines climatic data through a variety of data-based drought indices and indicators and "local expert input" to estimate the impacts of meteorological droughts in terms of indices. The map of the Drought Monitor corresponds to four levels of drought intensity (ranging from D1 - D4) and one level of "abnormal dryness" (D0) (see Table 1). But the reference of the Drought Monitor to areas experiencing agricultural or hydrological drought impacts basically extrapolates the knowledge about drought risks in these sectors from the conditions in the United States. The indication of hydrological or agricultural droughts is not always referenced to an actual analysis of impacts in these sectors in Mexico. Therefore, it is necessary to consider a new approach to define when a meteorological drought reaches critical levels to become a hydrological or agricultural drought.

Precipitation deficit negatively affect surface or subsurface water supplies (*i.e.*, streamflow, reservoir and lake levels and groundwater) and may result in hydrological droughts. However, in some cases hydrological droughts may occur due to poor water management, even when precipitation is within its normal range. Water management problems may at times explain hydrological, as well as agricultural and socioeconomic droughts. Therefore, in a risk context, monitoring hydrological or agricultural droughts should consider the natural hazard, as well as the vulnerability context (Neri & Magaña, 2016). For instance, monitoring a hydrological drought should refer to measures of surface and subsurface water availability (streamflow, soil moisture, dam or lake levels, aquifer conditions) but in a more complete manner, it should also address issues related to supply and demand. This means that monitoring should include data on natural water availability, as well as on vulnerability indicators to reach a diagnostic on the severity of hydrological drought. The monitoring of water supply and demand may allow determining the anthropic factor that leads to a hydrological drought, but it also serves to determine preventive actions to inhibit the occurrence of such disaster.

Given that long-term observations of soil moisture are scarce, derived data with models becomes a valuable alternative to obtain information (Narasimhan & Srinivasa, 2005). Hydrological droughts usually lag meteorological droughts and their extent, duration and severity depend on water management practices in a watershed or basin. It is necessary to complement the in situ measurements with satellite estimates of soil moisture and groundwater (Houborg, Rodell, Li, Reichle, & Zaitchik, 2012). Some satellite-derived data on soil moisture also prove to be useful to estimate humidity deficit in agriculture or other ecosystems, for instance using NDVI. The lag between the precipitation deficit and its signal in surface or subsurface water deficit should be determined through adequate monitoring. It may be of the order of a few days to weeks to months, and turns to be important in a preventive decision-making. The characterization of hydrological droughts requires information on the whole hydrological cycle and an adequate representation using data assimilation methods. The use of remotely sensed data, including satellite groundwater monitoring, will greatly improve the estimates of water supply. Monitoring streamflow drought and issuing early warnings can result in efficient prevention actions as part of the water resource management. As in the case of the SPI to characterize meteorological drought, the Standardized Runoff Index, may serve to identify threshold values that may lead to a hydrological drought.

As a form of hydrological drought, streamflow droughts have been given more attention since they may lead to a number of negative impacts for the society and the environment. The survival of ecosystems depends on their homeostasis and resilience to water deficit and hydrological droughts, which may have profound effects in the environment (Lake, 2011). This aspect of drought on ecosystems is seldom analyzed in Mexico, except when it relates to forest fires. The drought events that had a large impact in terms of forest fires are related to the

• ISSN 2007-2422

occurrence of intense El Niño conditions, as in 1997-98 (Magaña, 1999) or the prolonged meteorological droughts in northern Mexico, as in Coahuila in 2011. Forest fire activity in Mexico is modulated by the vulnerability context (Galindo, Barrón, & Padilla, 2009). Consequently, the deficit in precipitation, atmospheric and soil moisture, temperature anomalies, along with vulnerability conditions, create drought risk for the development of wildfires.

Besides the reduction in the flow of rivers and soil moisture deficits, meteorological droughts also contribute to agricultural losses. Agricultural droughts are related to seasons when the water requirements are not met due to precipitation deficit, large potential evapotranspiration, soil water deficits, and reduced groundwater or below normal irrigation reservoir levels. According to the US National Drought Mitigation Center "a good definition of agricultural drought should be able to account for the variable susceptibility of crops during different stages of the crop development, from emergence to maturity". It should also consider the capacity to adapt to unfavorable climatic, economic or environmental conditions, which changes from region to region for instance, between Mexico and the US. Therefore, the same indices to define how a precipitation deficit may result in agricultural drought should be evaluated at the regional context considering local vulnerabilities and capacities. Determining the causes of an agricultural drought requires establishing the socio-economical aspects and public policies in the sector. Two similar meteorological drought events may have contrasting impacts depending on the vulnerability context in which they occur. Therefore, if the goal is to prevent an agricultural drought or to diminish its impacts, the monitoring efforts should consider a complete risk evaluation. When hydrological and agricultural droughts are more severe or prolonged than a critical level, water to support food crops may not be enough to produce vegetables for people, or grass and grain for livestock and poultry. This may be the beginning of a serious socioeconomic impact. There is no unique way to define the magnitude of an agricultural drought since it may be given in terms of the area or the percentage of crops affected, as well as the social or economic costs of the losses. Even more, one of the main challenges in defining the magnitude of an agricultural drought is to separate the observed impacts related to precipitation deficit, from other natural or anthropic hazards. This is a key issue that relates drought with the Mexican economy, since the impacts are related to the losses in this sector due to low production and the food imports that are necessary.

The socioeconomic drought corresponds to low water availability for daily activities of the population. A socioeconomic drought may be considered the final stage of a meteorological drought, when vulnerability conditions are high enough as to result in a severe water deficit that impact at the urban level. The potable water provision may be compromised under social drought conditions, if no adequate plans exist to respond to potable water shortages. As the population and per capita consumption grow, the demand for economic goods also grows and the chances of a socioeconomic drought increase (Wada, Van Beek, Wanders, & Bierkens, 2013). This may be a reason why droughts at the urban level appear to be more frequent nowadays. In addition to precipitation deficit, socioeconomic droughts may also result from increasing demands and poor urban water management practices. Socioeconomic droughts are highly related to water management practices at the urban level and consequently, they involve societal perception of risk to below normal precipitation. Analyzing the vulnerability of urban centers to drought may lead to structural and non-structural measures aimed at reducing the impacts in case of meteorological droughts. In large urban centers of Mexico, the water crisis makes the highly vulnerable to drought. The extremely high pressure on water of Mexico City led to a social drought in December 2009, even without the occurrence of a real meteorological drought. The positive trend in precipitation in the Mexico Valley does not compensate for the

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 115-133
ISSN 2007-2422 •

increasing demands of potable water and consequently, social droughts are expected to be more frequent and severe unless structural measures to reduce the water crisis be implemented.

The lack of clean water for drinking, public sanitation and personal hygiene results in a wide range of diseases. Therefore, social droughts may have to do with not enough quantity and quality of water in urban environments. In extreme situations, the social impacts of drought may also correspond to thirst, hunger and famine. When water supplies are scarce due to drought, the competition for this natural resource may lead to social conflicts (Endfield & O´Hara, 1997; Castro, Kloster, & Torregrosa, 2004) that need to be controlled. Drought may also force many people to migrate in search of more favorable living conditions, with access to water, food, and without the disease and related social conflicts. Under drought conditions, bush and forest fires lead to major environmental and social disasters. Wildfires may affect communities, their health and their property. The emissions of wildfire result in poor air quality that increases the risk of respiratory diseases. The impact of droughts on health is dependent on the socio-economic environment that can influence the resilience of the population. Poor health, poverty, and conflict are additional contributing factors to the impact of drought. Forest fires emissions are an aspect of drought directly related to drought that may extend to several kilometers away from the wildfire, affecting numerous communities. Wildfire prevention should be examined in a risk context, considering dry environmental conditions, but also the socioeconomic context favors the occurrence of these events.

There are also important social aspects of drought for human activities that relate to anxiety or depression about the economic losses or conflicts among people when there is not enough water (*e.g.*, Dean & Stein, 2007). Frequently, drought forces people to radically change their lifestyle, including people´s perception on the value of water. Such changes in people´s behavior frequently lead to more efficient use of this resource and flexibility to accept new water public policies. This was the case of the Mexico City Metropolitan Area in 2009 when water authorities were announcing a severe water crisis (See Restrepo in *La Jornada*, http://www.jornada.unam.mx/2009/08/24/opinion/018a2pol). Even more, water managers and authorities may take this opportunity to implement public policies on the efficient use of water considering changes in tariffs for potable water in all sectors and regions.

Drought also affects the environment in several ways. The ecosystems health depends on water quantity and quality. Under drought conditions, the food supply reduces and habitats are affected. Even more, extreme maximum temperature may induce stress in the comfort standards of several animal species. In some ecosystems, the damage is temporary and resilience allows ecosystems to recover, i.e., the water and food supply return to normal conditions. However, prolonged or severe droughts may have a permanent negative impact. For instance, some aquatic ecosystems may disappear and alter the surrounding regions, even when rains recover. Other effects of drought on the ecosystems include diseases in plants and animals, migration of wildlife, loss of wetlands, erosion and loss of soil quality. Some of the negative impacts of drought may be exacerbated when other anthropic pressures exist on the ecosystems. In most ecosystems of Mexico, meteorological drought is not equivalent to wildfires. However, slash and burn practices in traditional agriculture may result in higher risk of wildfires under drought conditions.

The impacts of drought may be quantified in terms of the economic costs. People and economic sectors generally pay the costs of drought with economic assistance from government agencies. Most evaluations on the economic impacts of drought refer to the direct costs of the disaster, such as loss of crops, irrigation or wells to pump water from the aquifers. There are also payments to make for food and water to maintain farm activities, for instance. But indirect costs related to drought should also be

• ISSN 2007-2422

taken into account, for instance, those related to supplies to maintain the activity, as a mean of adaptation to an anomalous climatic conditions (water pumps, fertilizers, etc.). In countries that highly depend on hydropower generation, diminished access to water can make them experience increased costs of electricity due to reduced streamflow and dam levels. Hydroelectric power generation companies are also affected in their finances since they may have to spend more on alternative fuel sources, when hydropower generation is not enough. River navigation may turn difficult affecting commerce and transportation. In the Panama Canal, the size of ships has to be limited due to hydrological drought in the lakes that provide water for the functioning of the locks, as under El Niño conditions (Magaña, 1999). However, drought may also represent business opportunities for some that may provide goods and services that substitute those that are missing due to drought.

The impacts of droughts are not always easy to determine since the corresponding vulnerability factors are seldom considered as part of a risk analysis. For instance, prolonged droughts during 2000-2002 and 2010-2012 had similar magnitudes and spatial extent over northern Mexico, but contrasting socioeconomic impacts due to different vulnerability contexts. Therefore, drought related disasters should be explained considering the vulnerability context in which they occur. An adequate identification of vulnerability to drought factor is necessary not only to explain disasters, but also to define the most efficient risk management practices, as to prevent their negative effects. At present, most countries only respond to droughts by providing financial assistance to recover from the economic losses (Wilhite *et al*., 2014).

In summary, monitoring of droughts is no limited to physical parameters, but should include indicators of the social, economical and environmental conditions that create a context of vulnerability. Such context modulates the magnitude of risk and consequently, influences the magnitude of the impacts. Creating a risk function for hydrological, agricultural or socioeconomic drought may also serve to monitor the efficiency of various measures aimed at reducing vulnerability and risk. The definition of lead and lag times may well define some of the characteristics of the monitoring schemes and the data bases to be created to examine processes associated with drought or the quality of the predictions of droughts and impacts.

b) Processes and Prediction of Droughts

Climate prediction provides opportunities to increase the lead times of early warning systems. Scientists have made significant advances in understanding regional interannual climate variability, mainly based on considerations of air sea interactions and climatic teleconnections, as those related to El Niño Southern Oscillation (ENSO) (see Díaz, Hoerling, & Eischeid, 2001). But the potential for improved drought predictions in the near future varies from region to region, season to season and on the dominant climatic regime. The relationships between sea surface temperature (SST) anomalies and regional climate variability has led to the development of empirical and dynamical seasonal climate forecasts, mainly for the tropical and subtropical regions. In the extratropical regions however, current long-range forecasts are of limited reliability and only few ENSO-precipitation relationships exist to explain part of the climate variability in the midlatitudes. But low climate predictability should not prevent stakeholders from defining drought risk management strategies. By means of structural measures, sectors may become less vulnerable and more resilient to drought. If no drought risk management strategies are implemented, prolonged meteorological droughts may affect more people than most other natural hazards.

It is not clear if droughts around of the world are becoming more frequent, but several studies project that droughts may occur more frequently in relation to climate change (Dai, 2013; IPCC, 2013). Most of the climate change scenarios project a drier climate but also consider the large

ISSN 2007-2422

uncertainty on projections of the hydrological cycle. Caution or uncertainty on the projections of drought under climate change arise from the fact that some studies indicate that droughts are becoming less frequent and intense over parts of the world, for instance over most of the US (Andreadis & Lettenmaier, 2006; McCabe & Wolock, 2015). Climate change may not produce more droughts, but it could exacerbate them and it will probably expand their domain in the subtropical dry zone. Paleoclimatic studies on drought are becoming more relevant to examine how the climatic extreme is changing in the time scale of centuries. Several of them indicate that meteorological droughts, like the ones observed in recent decades, have always been part of natural climate variability. In particular, paleoclimatic studies about droughts have become more relevant since it is not clear if droughts are becoming more frequent, intense or prolonged over Mexico (Villanueva-Díaz *et al*., 2007).

Understanding the dynamical processes of climate that result in drought is a fundamental step to gain confidence on any projection about drought for the future. The use of climate model output to conclude on what the future drought activity will be like in Mexico may fall on the realm of speculation and may not add additional information on how to prepare for such events. An analysis on the low frequency variations of regional climate in Mexico, the external forcing mechanisms, the internal variability of climate, and the role of human induced changes in climate are among the process analyses that are required to document the causes of meteorological droughts in the past, but also, to evaluate the capacity of climate models to simulate periods of prolonged precipitation deficit.

Despite advances in the understanding of drought, the current capabilities of monitoring and prediction are not up to the needs of users, particularly regarding quality forecasts at the regional level for decision-making (Quan *et al*., 2012). But in the particular case of droughts in Mexico, there is a broad spectrum of dynamical problems to be addressed in order to determine their characteristics. It is known that SST anomalies act as a forcing mechanism to modulate climate variability over most of Mexico, but the way in which such signals are related to changes in the precipitation require examining the dynamics of the anomalous atmospheric circulations (Méndez & Magaña 2010; Seager *et al*., 2009). Changes in the intensity of subsidence, or in the flux of water vapor need to be examined on various temporal and spatial scales. The role of moisture flux from the Intra Americas Seas (IAS) into Mexico appears to involved transient mean flow interactions, difficult to reproduce by climate models. In addition, a single tropical cyclone entering to Mexico may completely change the statistics of climate in a few days. In this way, even in the middle of a drought period, precipitation anomalies tend to be positive, as in the summer of 2010 in northeastern Mexico. Current climate models do not have the skill to produce this type of phenomena and consequently, there are problems in reproducing meteorological drought conditions over Mexico. Domínguez (2012) found that there are higher probabilities of tropical cyclone formation over the IAS when drought conditions occur over northern Mexico.

Within the broad spectrum of research on drought, the needs of users have to be taken into account. This means that the connection between meteorological and hydrological, agricultural and socioeconomic droughts have to be determined. It is not only a matter of examining by means of data or numerical models the signals of streawflow reduction, soil moisture deficit, hydroclimatic requirements of crops, etc. It is necessary to consider the vulnerability context that results in some of the anomalous conditions in the water and agricultural sectors. So, the need to consider a multidisciplinary approach to these problems is becoming more relevant when the objective is to provide useful information to decision makers within Pronacose, for instance. Those studying the basic the physical and dynamical mechanisms of drought and those involved in designing new tools for drought monitoring and forecasting with operational and service purposes, should consider the

drought problem in its socioeconomic dimension as well, since this is the way in which some dry spells may turn into an adverse situation for sectors and people. Thus, drought has a wide range of impacts depending on the scale of the event and which some components of the hydrological cycle are affected by an anthropic modulating effect. The history of drought impacts is a useful context to show the dynamics of vulnerability and risk to this phenomenon (García-Acosta *et al*., 2003).

Meteorological, hydrological and even agricultural drought forecasting begins with adequate analysis obtained from climate models, which makes them an essential tool for planning. However, climate models quality needs to be evaluated in order to determine how important seasonal climate forecasts can be in the planning process, particularly in terms of drought information. Climate models tend to adequately predict seasonal dry periods over most of the Mesoamerican and part of northern Mexico by using ENSO - regional precipitation dynamics or statistical relationships (Magaña, Vázquez, Pérez, & Pérez, 2003; Seager *et al*., 2009). However, some regions do not show significant predictability during some part of the year. The North American Monsoon and the corresponding rains over northwestern Mexico are still a subject of study when the objective is to have useful seasonal forecasts (Higgins & Gochis 2007; Ray *et al*., 2007). The link between meteorological and hydrological modeling has been the goal of several groups around the world (*e.g*., Mishra & Singh, 2010). There are also efforts to produce models that simulate the effects of climate on agricultural productivity around the world (Boken, Cracknell, & Heathcote, 2005). But in each case, the regional characteristics on local management in a specific sector have to be addressed to provide useful predictions of the sector under analysis. A drought risks analysis in the agricultural or hydrological fields benefit though from the modeling initiatives when they are complemented with regional information on uses of the information and local water management practices.

In Mexico, meteorological droughts have seriously affected the socio-economic sectors and the environment, especially in the center-north of the country (Garcia-Acosta, 2003; Magaña & Neri, 2012). The arid and semi-arid conditions prevailing in these regions of Mexico lead to significant losses in agricultural and livestock activities under prolonged drought. In the world, the impacts of drought include migration and the abandonment of agricultural subsistence activities (Lee, 2014). Short-term droughts, such as associated with El Niño, have negative consequences mainly in seasonal agriculture or forestry (Delgadillo-Macías, Aguilar-Ortega, & Rodríguez-Velázquez, 1999). Prolonged meteorological and hydrological droughts, as occurred between 2000 and 2002, generated difficulties in complying with the binational water treaties between Mexico and the United States. Drought in North America between 2010 and 2012 is considered the most serious, with contrasting impacts in Mexico and the United States (Combs, 2012).

It is clear that the objective of a program like Pronacose is not only to have seasonal climate diagnoses and predictions for specific sector, but also to have a number of options to ameliorate the impacts of drought in a preventive sense. Impacts of drought can be reduced if there are warnings (based on predictions) and alternatives for the most vulnerable socioeconomic sectors. National drought policies to reduce the negative impacts of droughts have been developed in countries such as United States, Australia and South Africa they have developed (*e.g*., Wilhite *et al*., 2014). Most of them tend to create more resilient sector or groups, focusing on the subsequent impact interventions by providing economic assistance to those affected. But the goal is to have preventive programs to reduce vulnerability, including the establishment of comprehensive early warning systems from improved seasonal forecasts and risk awareness on drought (Steinemann, 2006). Responses to drought warnings include optimizing the use of water in households, agriculture, livestock and industry, increasing water storage and improving distribution infrastructure (UN-ISDR, 2007).

ISSN 2007-2422 • *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 115-133

c) Drought Risk Analysis and Prevention Schemes

The identification of possible actions to be taken during the drought and the need to support decision makers are important challenges and have been of interest for many years (Walker, Hrezo, & Haley, 1991). Moving from the generation of climate forecasts to actual applications of climate information may consider: 1) Developing drought forecasts and relevant climate information for decision making should be in a risk management context; 2) It is necessary to have a continuous dialogue between drought information providers and users of the information; 3) the effective communication of drought should be in terms of risk scenarios, including potential impacts, costs, and feasible actions to reduce the potential impacts, and 4) a post-event evaluation of the value of the information and the actions taken during the event that demonstrate usefulness. It is common to examine ways to have regions and sectors better prepared to deal with drought by improving water use information, with clear goals and priorities on water uses that promote water conservation. But the achievement of these goals should be based on a water governance project.

A drought risk analysis is a way to better understand a region's drought vulnerability and identify the appropriate mitigation actions to take. Only few drought risk assessments have been conducted for Mexico at the regional level that can lead to structural and non-structural measures to reduce vulnerability. Despite the importance of drought for Mexico, relatively few studies have been conducted to better understand its regional meteorological, economic, social and environmental aspects from a risk analysis perspective. So far, most analyses on the subject only focus on describing the abnormal conditions hydro-climatic parameters and their impacts in sectors such as agriculture and cattle ranching. A drought risk function should be evaluated using information on the impacts of drought for recent events. There are few studies on the impacts of droughts in Mexico, which compare the negative effects from one event to another, explaining social, economic or environmental impacts considering different vulnerability factors, maintaining the dynamic and multifactorial the essence of vulnerability. For instance, the 2010-2012 drought in Mexico had an economic cost of the order of three billion dollars, thousands of people affected (agriculturists, cattle ranchers) and environmental consequences such as the forest fires in the spring of 2011 in the state of Coahuila in northern Mexico (Magaña & Neri, 2012). These impacts contrast with those during the 2000-2002 drought, which were mainly related to the failure of the Mexican authorities to fulfill the 1944 US-Mexico Water Treaty.

There are multiple requests for information on droughts in time scales longer than a season. Prolonged droughts or drought activity on time scales of decades are becoming important topics for research. Of course, the potential impacts of climate change in relation to drought are also part of such interest. But as a first step in Mexico, information on changes in the water cycle in time scales of less than a few years may be enough to change the paradigm in which water management under drought is conducted in Mexico. Several decision makers (water managers, energy sector, farmers, etc.) may look more carefully at drought impact scenarios as long as they are expressed in terms of elements of interest for the specific sector of their concern. From the user's perspective, the relevant information for drought management depends on what is being at risk. In water availability for example, the key element can be water in dams. In this case, the predictions of that specific hydrological variable is much more relevant than, for example, forecasts of seasonal rainfall, or drought indices. It is therefore necessary to conduct research on how to produce and communicate such relevant information in order to quantify its impacts in the decision-making process as expected within Pronacose.

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 115-133 • ISSN 2007-2422

d) Communication on Drought in a Decision Making Process

The use of information on drought by decision makers should show some tangible benefit, or at least a potential benefit. Information has value when it is disseminated in such a way that the end-users get the maximum benefit in applying its content. Climatic or drought information is part of a continuum that begins with scientific knowledge and understanding and ends with evaluation of the information. There are several proposed means to communicate climate information to stakeholders, but the most adequate one for a particular sector or region should be determined. The processes of communicating information about drought is not limited to provide climate or impacts scenarios on hydrological or agricultural drought, but should include capacity building to interpret messages. Therefore, the communication process involves identifying the user´s community and an adequate mean to interact with it. The communication process should also be maintained before, during and after a drought to induce secure water management practices. It varies in each stage, but the message should lead to form a sector in which stakeholders know: when there is a drought, who is in charge of specific actions; means to change water allocations and uses, and schemes to verify that actions are implemented.

Several initiatives are being developed to define way to communicate drought information that leads to preventive actions. A particular element in the communication process is credibility so that users can act accordingly. Those who generate drought information, for instance in terms of climate or impact scenarios, must clearly document the ability and limitations of their predictions. Decisions on drought require forecasts and climate monitoring, but in the impact scenario development it is necessary to have decision makers participation. For example, precipitation forecasts may be validated with data from the climate monitoring system, but it is the water manager the one who decides on the validity of a scenario on water availability. The participation of stakeholders interested on drought information requires collaboration among climate information providers and potential users of the information.

The need for adequate communication of drought risks is of major relevance for Mexico where vulnerability to a changing climate is large. Although adaptation to climate change is in the Government and non-government planning, poor understanding of the vulnerability factors or limited awareness on the on the functioning of a sector or the capacity of decision makers have not allowed to generate successful examples on the benefits of using climate information. The challenge on documenting an end to end project on the value of using climate information among users is one of the tasks to be conducted in a drought research plan.

Summary and Conclusions

Droughts always pose difficulties for water managers, farmers and society in general. Although droughts are a recurrent natural hazard with important negative impacts in Mexico, it is not until recently that public policies are being developed to specifically address their effects. Usually, after a period of precipitation deficit and severe water scarcity, stakeholders and authorities are more sensitive to the need to be more efficient in water management and use. After the major drought in northern Mexico during the 2010-2012 period, Pronacose, as a public policy to ameliorate hydrological, agricultural or socioeconomic droughts was developed. However, such Program requires to be constructed on solid scientific basis. There are still several unsolved problems on drought that require to be addressed in order to promote pre-drought planning and investments in efficient water infrastructure, reductions in per-capita water use, more effective coordination between water agencies, and timely response to water shortages among the most vulnerable groups. In addition, water agencies and governments need to adopt, implement national drought policies, based on the principles of early warning, prepa-

ISSN 2007-2422

redness and risk management. It is along these lines of thought, that the Mexican Water Agency defined a National Program against Drought (Pronacose), to change a costly response to the disaster into a more efficient and less expensive prevention scheme.

An important element in the Scientific Plan to study Drought in Mexico should be the characterization of meteorological drought as a natural hazard, and hydrological, agricultural and socioeconomic drought as manifestations of precipitation deficit in a vulnerability to drought context. This means that the consequences of meteorological droughts should be diminished by means of risk management schemes, which in turn requires the adequate characterization of the vulnerability factors. The latter requires the participation of climatologists, hydrologists, agronomists, economists, social scientist, along with decision makers and stakeholders. The risk management approach to reduce the costs of drought based on a solid scientific basis should lead to the definitions of action prior to, during and after the drought conditions.

The proposed approach to generate relevant scientific drought information should be framed in a more ambitious scientific national water assessment program. As in most parts of the world, an improved strategy to manage water in general, and drought conditions in particular, should rely on:

1. Governance: organizational, legal and policy framework.
2. Risk identification, assessment, monitoring and early warning.
3. Capacity building and education.
4. Reduction of underlying risk factors.
5. Preparedness for effective response and recovery.

The planning for and the management of the effects of droughts appear to reach a higher priority in the Federal Government and apparently, in states with severe water shortages. The main goal of government policies is to reduce the costs of hydrological, agricultural and socioeconomic droughts that may be of the order of hundreds of millions of dollars in some sectors. In addition, the environmental impacts may result in the loss of large areas of natural vegetation and negative effects in other ecosystems. Reforms in the water legislation may lead Conagua to take a more proactive approach to managing the effects of droughts and spur such interest in other government agencies. Several factors will have to coexist before Pronacose becomes an effective strategy to mitigate the effects of droughts. Such factors may be the occurrence of a drought that is long and extensive, thereby increasing demands on a fixed water supply, and a public awareness of the economic costs of droughts. As water demands continue to grow, even minor droughts will become more serious, and society and socioeconomic sectors, in collaboration with the Mexican government will make Pronacose scientific research initiative an important element for improved water-management plans.

Acknowledgements

The author thanks Gustavo Vázquez, Nuria Vargas, Luis Clemente López and Luis Manuel Galván for their kind assistance in the preparation of the manuscript. This paper was prepare with the financial support of Conacyt INEGI under Grant 209932, from UNAM Grant IN106815-PAPIIT, and the Pronacose (Conagua) funds.

References

Acosta, J. A., Acosta, E., Padilla, S., Goytia, M. A., Rosales, R., & López, E. (1999). Mejoramiento de la resistencia a la sequía del frijol común en México. *Agronomía Mesoamericana*, *10*, 83-90.

Andreadis, K., & Lettenmaier, D. P. (2006). Trends in 20th Century Drought over the Continental United States. *Geophysical Research Letters*, *33*, 10.

Bellon, R., Gómez, A., Smalel, M., Berthaud, J., Rosas, I. M., Solano, A. M., & Martínez, R. (2004). Intervenciones participativas para la conservación del maíz en fincas de los valles centrales de Oaxaca, México (pp. 118-123). En: *Manejo de la diversidad de los cultivos en los agroecosistemas tradicionales*. Chávez-Servia, J.L., J. Tuxill y D.I. Jarvis (eds.). Roma: Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos.

• ISSN 2007-2422

Boken, V. K., Cracknell, A. P., & Heathcote, R. L. (2005). *Monitoring and Predicting Agricultural Drought: A Global Study* (p. 496). Oxford, UK: Oxford University Press.

Castro, J. E., Kloster, K., & Torregrosa, M. L. (2004). Ciudadanía y gobernabilidad en México: el caso de la conflictividad y la participación social en torno a la gestión del agua (pp. 339-369). En: *El agua en México vista desde la academia*. Jiménez, B., & Marín, L. (eds.). México, DF: Academia Mexicana de Ciencias.

Combs, S. (2012). *The Impact of the 2011 Drought and Beyond*. USA: Texas Comptroller of Public Accounts.

Conagua (2014). *Análisis espacial de las regiones más vulnerables ante las sequías en México* (43 pp.). México, DF: Semarnat. Recuperado de http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/sequiasB.pdf.

Contreras, S. C. (2005). Las sequías en México durante el siglo XIX. *Investigaciones geográficas*, *56*, 118-133.

Cook, B. I., Miller, R. L., & Seager, R. (2009). Amplification of the North American "Dust Bowl" Drought through Human-Induced Land Degradation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 4997-5001, doi: 10.1073/pnas.0810200106.

Dai, A. (2011). Drought under Global Warming: A Review. In: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, *2*(1), 45-65.

Dai, A. (2013). Increasing Drought under Global Warming in Observations and Models. *Nature Climate Change*, *3*, 52-58, doi: 10.1038/nclimate1633.

Dean, J. G., & Stain, H. J. (Feb., 2010). Mental Health Impact for Adolescents Living with Prolonged Drought. Aust. J. Rural Health, *18*(1):32-37.

Delgadillo-Macías, J., Aguilar-Ortega, T., & Rodríguez-Velázquez, D. (1999). Los aspectos económicos de El Niño (229 pp.). En: *Los impactos de El Niño en México*. Magaña, R. V. O. (ed.). México, DF: SEP-Conacyt.

Díaz, H. F., Hoerling, M., & Eischeid, J. K. (2001). ENSO variability, teleconnections, and climate change. *Int. J. Climatol*., *21*, 1845-1862.

Domínguez, C. (2012). *Las lluvias de verano en México y el papel de los ciclones tropicales*. Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra. México, DF: Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.

Eakin, H. C. (2007). *Weathering Risk in Rural Mexico: Climatic, Institutional and Economic Change* (235 pp.). USA: The University of Arizona Press.

Endfield, G. H., & O'Hara, S. L. (October, 1997). Conflicts over Water in 'The Little Drought Age' in Central Mexico. *Environment and History*, *3*(3), 1997, 255-272.

Endfield, G. H., & O'Hara, S. L. (1999). Degradation, Drought, and Dissent: An Environmental History of Colonial Michoacán, West Central Mexico. *Annals of the Association of American Geographers*, *89*(3), 402-419.

Escalante-Sandoval, C., & Reyes-Chávez, L. (2012). *Análisis de la sequía meteorológica en el norte de México*. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica, Acapulco, Guerrero, México.

Galindo, I., Barrón, J., & Padilla, J. I. (septiembre-diciembre, 2009). Relación entre ganadería extensiva e incendios en zonas forestales del estado de Colima. *Avances en Investigación Agropecuaria*, *13*(3), 17-33.

García-Acosta, V., Pérez, J., & Molina, A. (2003). Tomo I. Épocas prehispánica y colonial 958-1822 (506 pp.). En: *Desastres agrícolas en México. Catálogo Histórico*. México, DF: CIESAS-FCE.

Garza, G. G. (2002). Frecuencia y duración de sequías en la cuenca de México de fines del siglo XVI a mediados del XIX. *Investigaciones Geográficas*, *48*, 106-115.

Hayes, M. J., Svoboda, M., Wilhite, D., & Vanyarkho, O. (1999). Monitoring the 1996 Drought using the Standardized Precipitation Index. *Bull. Amer. Meteor. Soc*., *80*, 429-438.

Hernández, M. E., Carrasco, G., & Alfaro, G. (2007). *Mitos y realidades de la sequía en México* (148 pp.). México, DF: UNAM, Instituto de Geografía.

Higgins, R. W., & Gochis, D. (2007). Synthesis of results from the North American Monsoon Experiment (NAME) Process Study. *Journal of Climate*, *20*, 1601-1607.

Houborg, R., Rodell, M., Li, B., Reichle, R., & Zaitchik, B. (2012). Drought Indicators Based on Model Assimilated GRACE Terrestrial Water Storage Observations. *Water Resources Research*, *48*, W07525, doi: 10.1029/2011WR011291.

IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1535 pp.) Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P. M. (eds.). Cambridge, UK & New York: Cambridge University Press, doi:10.1017/CBO9781107415324.

Joyce, R. J., Janowiak, J., Arkin, P., & Xie, P. (2004). CMORPH: A Method that Produces Global Precipitation Estimates from Passive Microwave and Infrared Data at High Spatial and Temporal Resolution. *J. Hydromet*., *5*, 487-503.

Lake, P. S. (2011). *Drought and Aquatic Ecosystems: Effects and Responses* (400 pp.). Noida, India: John Wiley & Sons.

Lee, A. W. (2014). *Reconceptualizing Environmental Migration: Empirical Findings from Downscaled Estimates of Drought in Rural Mexico*. Doctoral dissertation. Boulder, USA: University of Colorado at Boulder.

Liverman, D. M. (1999). Vulnerability and Adaptation to Drought in Mexico. *Natural Resources Journal*, 39(1), 99-115.

Magaña, V. O. (ed.). (1999). *Los impactos de El Niño en México* (219 pp.). México, DF: Dirección General de Protección Civil, Secretaría de Gobernación.

Magaña, V., Vázquez, J. L., Pérez, J. L., & Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño Precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, *42*(3), 313-330.

Magaña, V., & Neri, C. (2012). El reto de México. *Revista México Social del Instituto de Capacitación, Estudios e*

Investigación en Desarrollo y Asistencia Social, S. C., *1*(23), 10-12.

Márdero, S., Nickl, E., Schomook, B., Schneider, L., Rogan, J., Christman, Z., & Lawrence, D. (2012). Sequías en el sur de la península de Yucatán: análisis de la variabilidad anual y estacional de la precipitación. *Investigaciones geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, *78*, 19-33.

McCabe, G. J., & Wolock, D. M. (2015). Variability and Trends in Global Drought. *Earth and Space Science*, *2*, 223-228, doi: 10.1002/2015EA000100.

McKee, T. B., Doesken, N., & Kleist, J. (1995). Drought Monitoring with Multiple Time Scales. *Preprints Nineth conf. on Applied Climatology*, Dallas, 233-236.

Méndez, M., & Magaña, V. (2010). Regional Aspects of Prolonged Meteorological Droughts over Mexico and Central America. *J. Climate*, *23*, 1175-1188, doi: http://dx.doi.org/10.1175/2009JCLI3080.1.

Mendoza, B., Jáuregui, E., Díaz-Sandoval, R., García-Acosta, V., Velasco, V., & Cordero, G. (2005). Historical Droughts in Central Mexico and their Relation with El Niño. *Journal of Applied Meteorology, American Meteorological Society*, *44*, 709-716.

Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A Review of Drought Concepts. *J. Hydrology*, *391*, 202-216.

Narasimhan, B., & Srinivasa, R. (2005). Development and Evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for Agricultural Drought Monitorin. *Agr. Forest Meteorol.*, *133*(1-4), 69-88.

Neri, C., & Magaña, V. (2016). Estimation of Vulnerability and Risk to Meteorological Drought in Mexico. *Weather, Climate and Society*. AMS. *8*(2), 95-110.

Oelkers, E. H., Hering, J. G., & Zhu, C. (2011). Global Water Sustainability: Water: Is There a Global Crisis? *Elements*, *7*(3), 157-162, doi: 10.2113/gselements.7.3.157.

Ortega-Gaucin, D. (2012). *Sequía en Nuevo León: vulnerabilidad, impactos y estrategias de mitigación* (222 pp.). Apodaca, México: Instituto del Agua del estado de Nuevo León.

Ortega-Ochoa, C., Villalobos, C., Martínez-Nevárez, J., Britton, C. M., & Sosebee, R. E. (2008). Chihuahua's Cattle Industry and a Decade of Drought: Economical and Ecological Implications. *Journal Rangelands*, *30*(6), 2-7, doi: http://dx.doi.org/10.2111/1551-501X-30.6.2.

Palmer, W. C. (1965). *Meteorological Drought. Research paper 45*. Washington, DC: Weather Bureau, U. S. Department of Commence.

Pereyra, D., & Sánchez, B. (1995). Sequías prolongadas y déficit hídrico en el estado de Veracruz. *La Ciencia y el Hombre*, *7*(21), 153-167).

Quan, X., Hoerling, M., Lyon, B., Kumar, A., Bell, M., Tippett, M., & Wang, H. (2012). Prospects for Dynamical Prediction of Meteorological Drought. *Journal of Applied Meteorology*, *51*, 1238-1252, doi: http://dx.doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0194.1

Ray, A. J., Garfin, G. M., Brito-Castillo, L., Cortez-Vázquez, M., Díaz, H. F., Garatuza-Payán, J., Gochis, D., Lobato-Sánchez, R., Varady, R., & Watts, C. (2007) Monsoon Region Climate Applications: Integrating Climate Science with Regional Planning and Policy. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *88*(6), 933-935.

Rodríguez, G., & Juárez, C. (2011) Impacto de la sequía sobre los mercados agropecuarios en México. Sección Especial. *Economía Actual*, *4*(4), 26-29. Recuperado de http://www.uaemex.mx/feconomia/Publicaciones/e404/ea-15_Gabriela.pdf.

Steinemann, A. C. (2006). Using Climate Forecasts for Drought Management. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *45*, 1353-1361.

Seager, R., Ting, M., Davis, M., Cane, M., Naik, N., Nakamura, J., Li, C., Cook, E., & Stahle, D. W. (2009). Mexican Drought: An Observational Modeling and Tree Ring Study of Variability and Climate Change. *Atmósfera*, *22*(1), 1-31.

Sheffield, J., Wood, E. F., & Roderick, M. L. (2012). Little Change in Global Drought over the Past 60 Years. *Nature*, *491*, 435-438, doi: 10.1038/nature11575.

Stallings, R. A. (ed.) (2003). *Methods for Disaster Research*. Philadelphia, USA: International Committee on Disaster Research.

Svoboda, M., LeCompte, D., Hayes, M., Heim, R., Gleason, K., Angel, J., Rippey, B., Tinker, R., Palecki, M., Stooksbury, D., Miskus, D., & Stephens, S. (2002). The drought monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *83*, 1181-1190.

United Nations (2013). Cooperation Key to Drought Prevention. UN Officials Stress at High-Level Meeting. UN News Centre, 11 March 2013. Recovered from http://www.un.org/apps/news/story.asp?NewsID=44339#.Vb_cFRZVtwd.

UN-ISDR (2007). *Drought, Risk, Reduction Framework and Practices: Contributing to the Implementation of the Hyogo Framework for Action*. Lincoln, USA: United Nations, International Strategy for Disaster Reduction.

Vilchis-Francés, A. Y., Díaz-Delgado, C., & Bâ, K. (2014). *Sensibilidad de índices de sequía meteorológica para rangos de lluvia anual de 400 a 700 mm*. XIII Congreso Nacional de Hidráulica AMH, Puerto Vallarta, Jalisco, México.

Villanueva-Díaz, J., Stahle, D. W., Luckman, B., Cerano-Paredes, J., Therrell, M. D., Cleaveland, M. K., & Cornejo-Oviedo, E. (2007). Winter-Spring Precipitation Reconstructions from Tree Rings for Northeast México. *Clim. Change*, *83*, 117-131.

Villanueva-Díaz, J., Cerano Paredes, J., Vázquez-Selem, L., Stahle, D. W., Fulé, P. Z., Yocom, L., Franco-Ramos, O., & Ruiz-Corral, J. A. (2014). Red dendrocronológica del pino de altura (*Pinus hartwegii Lindl.)* para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México. *Investigaciones Geográficas*, dx.doi.org/10.14350/rig.42003

Wada, Y., Van Beek, L. P. H., Wanders, N., & Bierkens, M. F. P. (2013). Human Water Consumption Intensifies Hydrological Drought Worldwide. *Environ. Res. Lett.*, *8*, 034036.

Walker, W. R., Hrezo, M. S., & Haley, C. J. (1991). Management of Water Resources for Drought Conditions (pp. 147-156). Paper 2375. In: *National Water Summary 1988-89-Hydrologic Events and Floods and Droughts*. Paulson, R. W., Chase, E. B., Roberts, R. S., & Moody, D. W. (comps.). Denver: U.S. Geological Survey Water-Supply.

WCRP (2011). Workshop on Drought Predictability and Prediction in a Changing Climate. Barcelona, Spain 2-4 March 2011. Progress Report. Recovered from http://eprints.soton.ac.uk/189815/9/ICPO_162_WCRP_drought_Report.pdf.

Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, *10*(3): 111-120.

Wilhite, D. A. (2000). Hazards and Disasters: A Series of Definitive Major Works. Vol. 1-2. In: *Drought: A Global Assessment*. Keller, A. Z. (ed.). London: Routledge Publishers.

Wilhite, D. A., Sivakumar, M. V. K., & Pulwarty, R. (2014). Managing Drought Risk in a Changing Climate: The Role of National Drought Policy. *Weather and Climate Extremes*, *3*, 4-13.

WMO (2006). *Impacts of Desertification and Drought and other Extreme Meteorological Events*. WMO/td No.1343. Geneva: WMO.

WMO (2009). *Inter-Regional Workshop on Indices and Early Warning Systems for Drought (Lincoln, NE, Dec. 2009)*. Geneva: World Meteorological Organization.

Author´s institutional address

Dr. Víctor Magaña

Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Geografía
04510 Ciudad de México, México
vorlando@igg.unam.mx

Haga clic aquí para escribir al autor

Sequía en Durango, México.

Foto: Oscar Alonso Barrón.

Formulación simplificada de un índice de sequía, empleando una distribución de probabilidad mezclada

• Alfonso Gutiérrez-López* •
Universidad Autónoma de Querétaro, México
*Autor para correspondencia

• José Vargas-Baecheler •
Universidad de Concepción, Chile

• Víctor Reséndiz-Torres •
Universidad Autónoma de Querétaro, México

• Ivonne Cruz-Paz •
Universidad del Valle de México

Resumen

Gutiérrez-López, A., Vargas-Baecheler, J., Reséndiz-Torres, V., & Cruz-Paz, I. (septiembre-octubre, 2016). Formulación simplificada de un índice de sequía, empleando una distribución de probabilidad mezclada. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(5), 135-149.

En la actualidad, muchos son los procedimientos para caracterizar el fenómeno de las sequías, la mayoría de ellos se basa en el Índice Estandarizado de Sequía (SPI), el cual se calcula a partir de registros históricos de precipitación para un cierto periodo de estudio. Esta serie de datos se estandariza empleando diversas distribuciones de probabilidad, lo que permite el análisis de los impactos de las sequías a distintas escalas de tiempo. Lo complejo de este procedimiento es el uso de diversas distribuciones de probabilidad y que ninguno de sus parámetros tiene un significado físico. Este artículo presenta una metodología para el cálculo simplificado del índice SPI, con base en la hipótesis de que una serie de eventos ocurre de forma aleatoria en el tiempo. Se emplea un proceso de Poisson para explicar el número de días de lluvia y una distribución exponencial para caracterizar las láminas medias de precipitación. Buscando una explicación física de los parámetros de dicha distribución de probabilidad mezclada (Poisson-exponencial) se correlacionan de modo directo con el índice SPI, obteniendo un índice modificado que simplemente se calcula contando el número de días de lluvia del periodo, representando de manera sencilla y confiable la condición de sequía. La metodología se aplica en ocho estados del norte de la república mexicana.

Palabras clave: sequía, distribución de Poisson, régimen de precipitación, índice estandarizado de precipitación.

Abstract

Gutiérrez-López, A., Vargas-Baecheler, J., Reséndiz-Torres, V., & Cruz-Paz, I. (September-October, 2016). Simplified Design of a Drought Index, Using a Mixed Probability Function. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 7(5), 135-149.*

Nowadays, there are many procedures to characterize the phenomenon of drought; most of them are based on the Standardized Precipitation Index (SPI), which is calculated based on historical records of rainfall for a certain period of study. This set of data is standardized using various probability distributions, which enables the analysis of the impacts of droughts at different time scales. The complexity of this process is the use of various probability distributions and that none of its parameters have a physical meaning. This paper presents a simplified methodology for calculating the SPI, based on the hypothesis that a series of events occur randomly in time. A Poisson process is used to explain the number of raining days and an exponential distribution to characterize the mean rainfall high. Looking for a physical explanation of the parameters of the distribution of mixed probability (Poisson-exponential), they correlate directly with the SPI index, obtaining a modified index is calculated simply by counting the number of raining days in the period; representing a simple and trustworthy way the condition of drought. The methodology is applied in eight northern states of the Mexican Republic.

***Keywords**: Drought, Poisson distribution, rainfall regimen, standardized precipitation index.*

Recibido: 18/02/2016
Aceptado: 18/05/2016

Introducción

En la hidrología moderna es común observar series de eventos hidrometeorológicos que ocurren de manera aleatoria en el tiempo (Govindaraju, 2013). Los procesos de Poisson proporcionan modelos probabilísticos apropiados para explicar el número de eventos que ocurren o se producen a partir de cierto fenómeno (López-Segovia, Villaseñor-Alva, & Vaquera-Huerta, 2002). En hidrología es frecuente relacionar la distribución de Poisson con la ocurrencia de los eventos de precipitación, para explicar, por ejemplo, el intervalo de ocurrencia de tormentas como variables discretas, en donde se evalúa la ocurrencia o no de un evento de lluvia; intensidad y duración se presentan como dos variables aleatorias independientes y discretas (Tapsoba, 1997; Bacchi, Becciu, & Kottegoda, 1994; Le Barbé, Lebel, & Tapsoba, 2002; Gutiérrez-López, Descroix, & Lebel, 2002a). Incluso estudios tan precisos, como cuantificar el número de gotas, se basan en esta distribución. Calder (1986) propone un modelo estocástico de modelación de precipitación, el cual relaciona, mediante la distribución de Poisson, el número promedio de gotas de lluvia retenidas en una superficie dada con el número promedio de gotas de lluvia caídas. Lo anterior fundamenta la afirmación de que el proceso de Poisson es una herramienta adecuada para representar el comportamiento de fenómenos hidrometeorológicos (Ribstein, 1983; Wong, Lambert, Leonard, & Metcalfe, 2010; Soľáková De Michele, & Vezzoli, 2014; Sohrabi, Ryu, Abatzoglou, & Tracy, 2015). Cuando se utiliza el modelo mezclado Poisson-exponencial es posible evaluar también el riesgo hidrológico asociado con inundaciones y sequías de forma simultánea (Gutiérrez-López, Lebel, & Descroix, 2002b) de forma similar a un proceso jerarquizado de Neyman-Scott (Rodríguez-Iturbe, 1986). En esta distribución mezclada se demuestra que los parámetros de las dos distribuciones están relacionados a través de un factor de reducción de varianza, el cual es función de la estructura de correlación espacial de la precipitación (Cammalleri, Micale, & Vogt, 2016). Suponiendo que la lámina media por evento de precipitación sigue una distribución exponencial, el parámetro de escala ajustado a partir de la serie de lluvia diaria adquiere el mismo valor del parámetro de escala de la distribución de valores extremos tipo Gumbel, ajustando los valores máximos de lluvia mensual (Sivapalan & Blöschl, 1998; Gutiérrez-López, Lebel, & Mejía, 2005). Trabajos similares reemplazando la distribución exponencial por la distribución gamma han sido desarrollados en cuencas con registros de precipitación horaria en el centro del Reino Unido y Estados Unidos (Eagleson, 1978; Onof & Wheater, 1994; Wilks, 1998). Asimismo, la distribución de Poisson suele emplearse para modelar periodos de sequía (Sharma, 1996; Cameron, Beven, & Tawn, 2000). Por lo general, los periodos de sequía y de humedad durante una temporada de lluvias tienden a conservarse y pueden ser modelados utilizando un proceso de Markov de orden uno. Una forma tradicional para el análisis de estos fenómenos mínimos consiste en mezclar más de dos distribuciones. Así, una función de probabilidad de Poisson delimita la ocurrencia de periodos de sequía; la distribución geométrica se utiliza para obtener las probabilidades asociadas con el número de periodos, y la distribución Weibull modela la precipitación total dentro de un periodo húmedo (Mirakbari, Ganji, & Fallah, 2010). El análisis completo, que requiere la estimación conjunta de los parámetros de estas distribuciones, arroja resultados relacionados con la probabilidad de que en un día cualquiera se presente sequía; la probabilidad de que un día seco sea consecutivo a otro día seco, o la probabilidad de que un día húmedo sea consecutivo a otro día húmedo. Si bien este tipo de resultados describen de forma adecuada el intervalo de tiempo entre periodos de sequía, es deseable correlacionar los parámetros de una distribución de probabilidad, por ejemplo, con algún índice de aridez. Éste es precisamente el tercer objetivo de este trabajo. Para el caso de caudales en un río, un esquema similar de detección del déficit o exceso de corrientes en un intervalo de tiempo puede ser modelado por una distribución de Poisson

• ISSN 2007-2422

(Coles, Pericchi, & Sisson, 2003; Hughes, 2003). Debido a que en la mayoría de los países los ingenieros civiles evalúan las crecientes de diseño utilizando la extrapolación de valores extremos para el diseño de estructuras hidráulicas, el pronóstico hidrológico se realiza a partir de una interpretación de las frecuencias de probabilidades de ocurrencia de los eventos máximos (Pandey & Nguyen, 1999). En virtud de que el nombre de valores extremos es asignado a estas distribuciones debido a que éstas pueden ser obtenidas como distribuciones límite de los valores grandes o pequeños entre variables aleatorias independientes, cada una teniendo una distribución continua (Pandey & Nguyen, 1999; Escalante & Reyes, 2002), puede entonces hacerse la hipótesis de que el proceso compuesto Poisson-exponencial representa fenómenos extremos de sequía o de inundación debido a que contiene una distribución de extremos. Esto permitiría asociar la distribución mezclada Poisson-exponencial con una ley de valores extremos; es decir, eventos definidos por un proceso de Poisson, que dan lugar a lluvias puntuales distribuidas de forma exponencial.

Proceso compuesto Poisson-exponencial (Ley Fuga)

Esta distribución mezclada de probabilidad tiene su origen en el estudio de series cronológicas de eventos separados por duraciones aleatorias. Las dos hipótesis de base son la estacionariedad, que significa que las propiedades estadísticas de la serie cronológica no cambian con el tiempo, y la independencia, que se refiere a que cada uno de dichos eventos ocurre de manera independiente de los demás. El nombre de "Ley Fuga" (*Loi de Fuites*) proviene del estudio que realizó M. Morlat (Babusiaux, 1969) en la distribución de los gastos que se fugaban de una red de distribución de gas en Francia. Consiste en utilizar simultáneamente una distribución de Poisson, para representar la probabilidad de ocurrencia de un evento y una distribución exponencial para expresar la magnitud media de dicho evento.

Si se considera una variable aleatoria $y \geq 0$, que sigue una distribución exponencial simple, con parámetro de escala β, su función de densidad puede expresarse como:

$$f_Y(y) = \frac{1}{\beta} e^{-y/\beta} \tag{1}$$

Sea ℓ un número entero aleatorio que sigue una Ley de Poisson, de parámetro de forma $\lambda > 0$, el valor de su probabilidad será:

$$p_L(\ell) = \frac{e^{-\lambda}\, \lambda^{\ell}}{\ell\,!} \tag{2}$$

Así, una variable aleatoria $X = Y_1 + Y_2 + \ldots + Y_\ell$ puede representarse como la suma de $\ell > 0$ variables aleatorias independientes que siguen un proceso compuesto Poisson-exponencial con parámetro de forma λ, que denota la tasa de llegadas de un evento por unidad de tiempo, y un parámetro de escala β. Respecto a la duración, es equivalente decir que un número de eventos $n(t)$ seguirá una Ley de Possion para una duración t, o bien que el intervalo T entre dos eventos consecutivos sigue una ley exponencial sobre el mismo tiempo t.

$$f_T(t) = \frac{1}{\lambda} e^{-t/\lambda} \tag{3}$$

donde:
λ: duración entre eventos.
T: intervalo entre dos eventos.

Cabe recordar que la distribución exponencial es un caso particular de la llamada familia de distribuciones Gamma (Saporta, 1990). Sea $t_r = T_1 + T_2 + \ldots + T_r$ la suma de r variables que siguen una distribución exponencial (ecuación (3)). Es sabido que la función de densidad de la suma de r variables aleatorias independientes es el producto de convolución de las densidades de cada una de ellas (Tapsoba, 1997), lo cual permite considerar T como una variable que define las probabilidades de tener 1, 2, o más eventos desde cero hasta T.

Así, la función de densidad de probabilidad de la llamada Ley Fuga (proceso compuesto Poisson-exponencial) para la variable reducida $U = X/\beta$ estará dada por la expresión:

ISSN 2007-2422

$$f_U(u) = e^{-\lambda}\lambda e^{-u}\frac{I_1(2\sqrt{\lambda u})}{\sqrt{\lambda u}} \qquad (4)$$

$f(0) = f_0 = e^{-\lambda}$

Donde:

- λ es el parámetro de forma $\lambda > 0$ (número de eventos, días con lluvia dentro de un periodo de tiempo T).
- β es el parámetro de escala $\beta > 0$ (lámina media de lluvia por evento).
- I_1 es la función de Bessel de primer orden.

Es importante mencionar que este proceso compuesto Poisson-exponencial tiene una discontinuidad para el valor cero (excepto cuando $\lambda = 1$); es decir, la ordenada al origen tiene un valor de $\lambda e^{-\lambda}$. La figura 1 muestra las funciones de distribución y probabilidad de dicho proceso.

Estimación de parámetros

Considerando las hipótesis de esta distribución de probabilidad y el significado de los parámetros, se infiere que un procedimiento simple es el número de eventos nulos n_0 que existan en la muestra; esto es, el número de días secos, en la serie histórica de datos. Si $n_0 \neq 0$, el procedimiento de estimación requiere, para una correcta solución, tomar en cuenta el tamaño n de la muestra (Tapsoba, 1997). El logaritmo de la función de verosimilitud, de la cual se busca obtener el máximo, es la siguiente:

$$L = -\lambda n + \frac{(n-n_0)}{2}\text{Log}_e\frac{\lambda}{\beta} - \sum_{i=1}^{n-n_0}\frac{x_i}{\beta} - \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n-n_0}\text{Log}_e x_i + \sum_{i=1}^{n-n_0}\text{Log}_e I_1\left(2\sqrt{\frac{\lambda x}{\beta}}\right) \qquad (5)$$

La anulación de las derivadas parciales de L respecto a λ y β conducen a un sistema de ecuaciones:

$$-n + \frac{n-n_0}{2\lambda} + \sum_{i=1}^{n-n_0}\frac{I_1'(z_i)}{I_1(z_i)}\frac{z_i}{2\lambda} = 0 \qquad (6)$$

$$-\frac{n-n_0}{2\beta} + \sum_{i=1}^{n-n_0}\frac{x_i}{\beta^2} - \sum_{i=1}^{n-n_0}\frac{I_1'(z_i)}{I_1(z_i)}\frac{z_i}{2\beta} = 0 \qquad (7)$$

en donde:

$$z_i = 2\sqrt{\frac{\lambda x_i}{\beta}} \qquad (8)$$

$I_1'(z)$ es la primera derivada de $I_1(z)$. Resolviendo el sistema de ecuaciones miembro a miembro de las ecuaciones (6) y (7) se obtiene:

$$\bar{x} = \hat{\lambda}\hat{\beta} \qquad (9)$$

Las propiedades de la función de Bessel permiten escribir la derivada de I_1 como:

$$I_1'(z) = I_0(z) - \frac{1}{z}I_1(z)$$

I_0 es la función de Bessel de orden cero. Empleando esta expresión en la ecuación (5) y sustituyendo $\bar{x}$ en la expresión (9) $\frac{z_i}{2\lambda} = \sqrt{\frac{x_i}{\bar{x}}}$ se obtiene:

$$g(\lambda) = \sum_{i=1}^{n-n_0}\frac{\text{I}_0(z_i)}{\text{I}_1(z_i)}\sqrt{x_i} - n\sqrt{\bar{x}} = 0$$

cuya solución es un valor único y positivo de $\hat{\lambda}$. La función $g(\lambda)$ es monótona y decreciente, su solución se encuentra en el intervalo $\left[10^{-4}, 5\hat{\lambda}_{\text{mom}}\right]$, en donde $\hat{\lambda}_{\text{mom}}$ corresponde al valor del parámetro estimado por el método de momentos. El valor de β se obtiene de la expresión (8). Le Barbé y Lebel (1997) proponen un procedimiento alternativo para la estimación de los parámetros del proceso compuesto Poisson-exponencial. Este método propone emplear el número promedio de días secos n_0 dentro del periodo T del total de n días. Tal procedimiento tiene una singular importancia, pues la información de los días secos no se emplea de manera directa en la estimación de parámetros de los métodos de momentos. De esta forma se tiene que los parámetros estará dados por:

$$\hat{\lambda} = -\text{Log}_e\left(\frac{n}{n_0}\right) \qquad \hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\lambda}} \qquad (10)$$

• ISSN 2007-2422

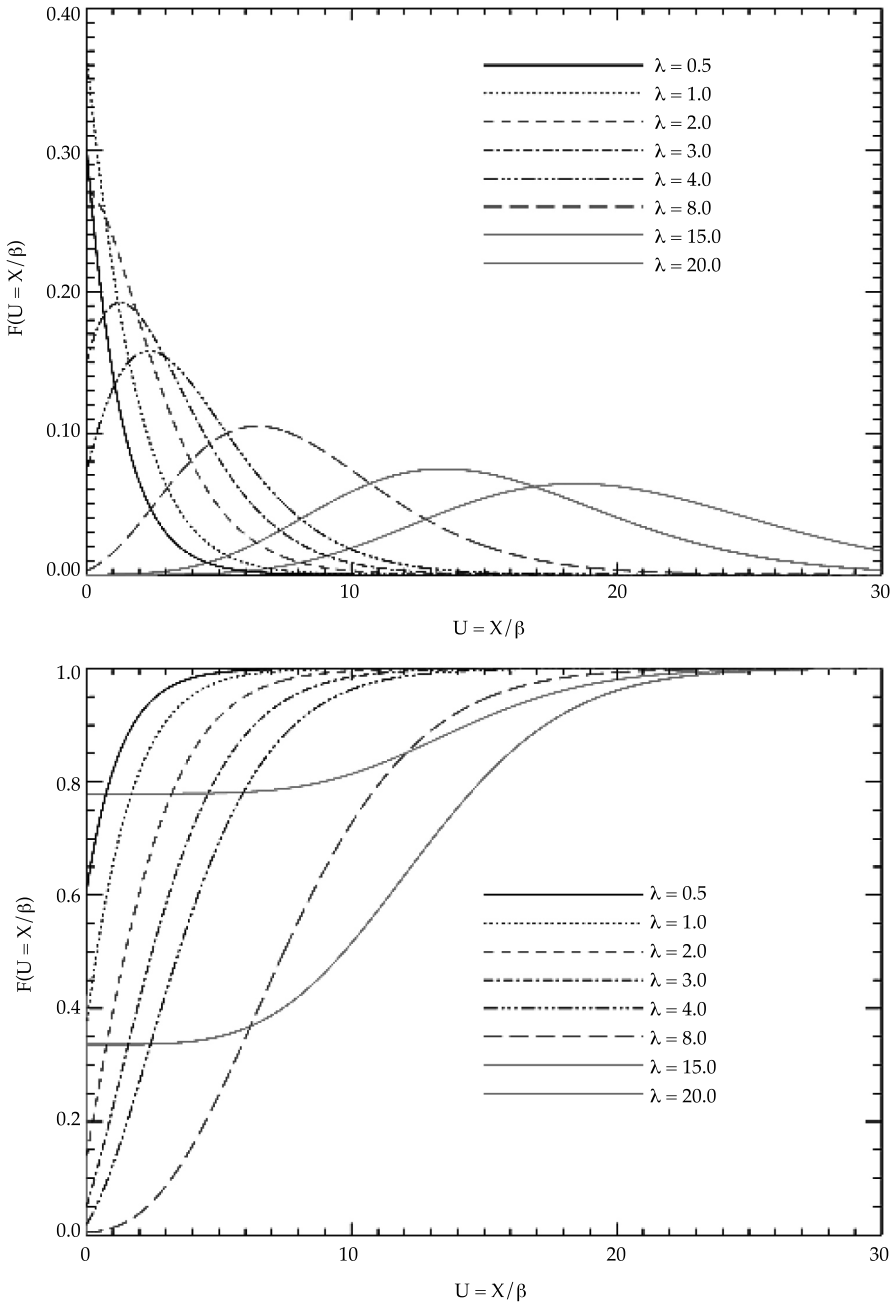


Figura 1. Funciones de densidad y acumulada para diferentes valores de λ.

Aplicación de la Ley Fuga

Para ejemplificar la aplicación de esta distribución en la modelación y análisis de la variabilidad espacial de la precipitación se seleccionaron ocho estados del norte de México, empleando series de lluvia diaria en registros promedio de 50 años de extensión dentro de un periodo que comprende los años de 1960 a 2013. El número de estaciones es variable, sin embargo se considera bien representado para cada uno de los estados seleccionados: Aguascalientes (49 estaciones); Estado de México (38); Guanajuato (21); Jalisco (85); Michoacán (20);

ISSN 2007-2422

Querétaro (31); San Luis Potosí (28), y Zacatecas (29). Para la validación del modelo se seleccionó la Región Hidrológica 10, situada al noroeste de la república mexicana. Las lluvias en esta zona se presentan en una época bien definida, pues el periodo más abundante se registra entre los meses de junio y octubre (Conagua, 2014). Sin embargo, es también una región sensible y expuesta a los cambios climáticos y a las sequías. Se han registrado largos periodos de sequía y también inundaciones provocadas principalmente por fenómenos meteorológicos extremos.

Validación del modelo

Se utilizaron las series históricas de las 93 estaciones climatológicas dentro de la región hidrológica 10 y se estimaron los parámetros del proceso compuesto Poisson-exponencial, empleando los tres procedimientos ya descritos. Con base en el estadístico χ^2 se seleccionaron los mejores ajustes y el método de momentos demostró, en la mayoría de los casos, dar el mejor ajuste a las muestras de datos (Gutiérrez-López *et al*., 2002b). Como se mencionó antes, el parámetro β ofrece una ventaja adicional, ya que con éste puede deducirse la distribución de la lluvia considerando diferentes intervalos de tiempo. Así, los parámetros λ^* y β^* deducidos en forma simplificada pueden estimarse de forma directa multiplicando por el intervalo de tiempo deseado. Es decir, los parámetros tienen un significado físico específico y pueden ser usados para diferentes valores de T. De esta forma, se tiene que el parámetro β permanece constante a lo largo del tiempo y el parámetro de forma λ puede calcularse para cualquier duración T, esto es:

$$\beta^* = \hat{\beta}; \quad \lambda_T^* = T\hat{\lambda}_T \tag{11}$$

Se aceptará que existe no estacionaridad en el caso de que el valor de λ tenga una variación mayor a 20% entre el valor máximo y mínimo dentro del periodo considerado. Esto quiere decir que se considerará como un proceso estacionario mientras se mantenga constante durante 80% del periodo; en caso contrario, el parámetro de escala debe estimarse como (Gutiérrez-López *et al*., 2002b):

$$\lambda_T^* = \frac{1}{T}\int_0^T \hat{\lambda}(t)dt \tag{12}$$

Cuando se dispone de datos de lluvia diaria es recomendable elegir T igual a un día (Lebel & Le Barbé, 1997; Lebel, Taupin, & D'Amato, 1997). El cuadro 1 muestra la validación del modelo para la estación Tamazula para el periodo 1947-2005. Los parámetros estimados del análisis de la lluvia diaria por el método de momentos fueron $\hat{\lambda} = 0.654$ y $\hat{\beta} = 12.214$. De ellos se pueden deducir los parámetros, por ejemplo, para un intervalo de 10 días, empleando la ecuación (4). Esto es: $\lambda^* = 0.654 \times 10 = 6.54$ y $\beta^* = 12.214$. Mientras que los valores reales de los parámetros, estimados de la serie de datos original, para el intervalo de 10 días son $\hat{\lambda} = 7.071$; $\hat{\beta} = 11.465$. De la misma forma se pueden estimar los parámetros para la cualquier otra duración T deseada.

Una ventaja de utilizar este proceso compuesto Poisson-exponencial radica en la posibilidad de asociar sus parámetros con un significado físico, los cuales pueden ser relacionados con conceptos de la gestión del riesgo hidrológico, ya que el parámetro $\hat{\beta}$ puede asociarse con una medida de la probabilidad de lluvia extrema y $\hat{\lambda}$ puede relacionarse con la probabilidad de ocurrencia de lluvia (sequía), tal y como se desarrollará a continuación.

Cuadro 1. Validación de los valores de los parámetros de escala y forma del proceso compuesto Poisson-exponencial.

	Estimado de la serie de datos original	Estimado con la ecuación (4)
t = 1 día	$\hat{\lambda} = 0.654$ y $\hat{\beta} = 12.214$	----------
t = 10 días	$\hat{\lambda} = 7.071$ y $\hat{\beta} = 11.465$	$\lambda^* = 6.54$ y $\beta^* = 12.214$
t = 30 días	$\hat{\lambda} = 20.083$ y $\hat{\beta} = 12.33$	$\lambda^* = 20.274$ y $\beta^* = 12.214$

• ISSN 2007-2422

El parámetro λ de la Ley Fuga como índice de sequía

El índice de precipitación estandarizado SPI (Standardized Precipitation Index) es uno de los índices utilizados en el mundo para evaluar y monitorear las sequías (Palmer, 1965; McKee, Doesken, & Kleist, 1993; Edwards & McKee, 1997). En general, este índice se calcula para intervalos de tiempo entre 3 (valor de SPI mínimo) y 48 meses (valor de SPI máximo), y permite identificar y clasificar posibles zonas susceptibles a presentar algún tipo de daño por sequía. La metodología para el cálculo del SPI se fundamenta en el ajuste de una serie de registros históricos de precipitación total mensual a una función de distribución Gamma incompleta, y en la transformación de los datos resultantes a la función de distribución normal estándar. Cabe recordar que la deducción del proceso compuesto Poisson-exponencial empleando una distribución exponencial es un caso particular de la llamada familia de distribuciones Gamma. De esta forma, el SPI representa el número de desviaciones estándar que cada registro de precipitación se desvía del promedio histórico. Los registros de precipitación superiores al promedio histórico del mes correspondiente tendrán valores positivos del SPI (presencia de humedad), mientras que los registros de precipitación inferiores al promedio histórico arrojarán valores del SPI negativos (déficit de humedad), tal como se muestra en el cuadro 2. Si bien se han propuesto otros índices de sequía simplificados (Pita, 2003; Karamouz, Rasouli, & Nazif, 2009), a la fecha ningún trabajo ha incluido de modo explícito el número de días lluviosos (intuitivamente incluido en la precipitación mensual) para estimar un índice de sequía. La aplicación del proceso compuesto Poisson-exponencial ofrece una ventaja, pues establece una relación del parámetro de posición de dicha distribución de probabilidad con el índice SPI (Kim, Valdés, & Yoo, 2006; Liu *et al.*, 2013). Basados en el hecho de que un evento de sequía puede caracterizarse definiendo su régimen, es decir, su magnitud y frecuencia, parece apropiado introducir la variable correspondiente al número de días con lluvia.

De esta forma, se propone relacionar el índice tradicional de sequía SPI con el parámetro λ del proceso compuesto Poisson-exponencial. A partir de la estimación de parámetros propuesta por Babusiaux (1969), empleando la ecuación (10) y poniendo todo en función del índice SPI, se obtiene una relación SPI-λ, que permite estimar un índice modificado SPI*. Esta relación es de la forma:

$$SPI^*(\lambda) = \left[1-(2-\sqrt{2})\sqrt{\frac{n_0}{n}}\right]\left[\frac{2\bar{x}^2}{s_x^2} - \mathrm{Log}_e\frac{n}{n_0}\right] + \mathrm{Log}_e\frac{n}{n_0} \qquad (13)$$

Cuadro 2. Valores convencionales de los índices SPI y PDSI (NDMC, 2003; Hayes, 2000).

SPI	Condición	PDSI
+2.00 o más	Excepcionalmente húmedo	+5.00 a +6.00
+1.50 a +2.00	Extremadamente húmedo	+4.00 a +5.00
+1.20 a +1.50	Muy húmedo	+3.00 a +4.00
+0.80 a +1.20	Moderadamente húmedo	+2.00 a +3.00
+0.50 a +0.80	Humedad incipiente	+1.00 a +2.00
+0.50 a -0.50	Humedad cercana a la normal	+1.00 a -1.00
-0.5 a -0.8	Sequía incipiente	-1.00 a -2.00
-0.8 a -1.2	Sequía moderada	-2.00 a -3.00
-1.2 a -1.5	Sequía severa	-3.00 a -4.00
-1.50 a -2.00	Sequía extrema	-4.00 a -5.00
-2.00 o menos	Sequía excepcional	-5.00 a -6.00

ISSN 2007-2422

Donde:

λ es el número de eventos (días con lluvia) dentro de un periodo de tiempo *T*.
SPI* es el índice de sequía estimado a partir del número de días con lluvia.

La figura 2 muestra la relación que existe entre el índice SPI y el valor del parámetro λ de la distribución de probabilidad Poisson-exponencial, representado con la letra L, para el mes de enero en el estado de Querétaro. De la misma forma, se obtuvieron las correlaciones para el resto de los estados analizados. En todos los casos se observa que existe una correlación promedio de 0.90, lo que garantiza una estimación confiable de la relación que existe entre el número de días con lluvia (λ) y el índice SPI. Las ecuaciones que predominan son los ajustes a rectas con valores agrupados en el valor de $\lambda < 0.40$ y después valores dispersos para valores superiores. A continuación se evalúan todos los meses del año para los estados en estudio. Los resultados de este procedimiento se muestran en la ilustración 3. En este caso y por razones de espacio, sólo se muestran algunos de los ajustes más representativos en los estados, en los meses de mayor sequía histórica.

Discusión

Una vez que se verifica la correlación del índice de sequía SPI y el valor del parámetro λ de la distribución de probabilidad Poisson-exponencial para todos los meses más representativos de los estados analizados, se procede a calcular el valor de SPI* como un estimado del valor real de SPI. Es importante mencionar que en algunos de los estados de nuestro país, la condición del SPI medio es muy cercana a la condición del SPI mínimo, como puede observarse en las figuras 3b, 3d y 3e.

En estas condiciones ocurre en los meses de invierno (diciembre, enero y febrero) lo que caracteriza el régimen de precipitaciones típico de la zona central de nuestro país, con

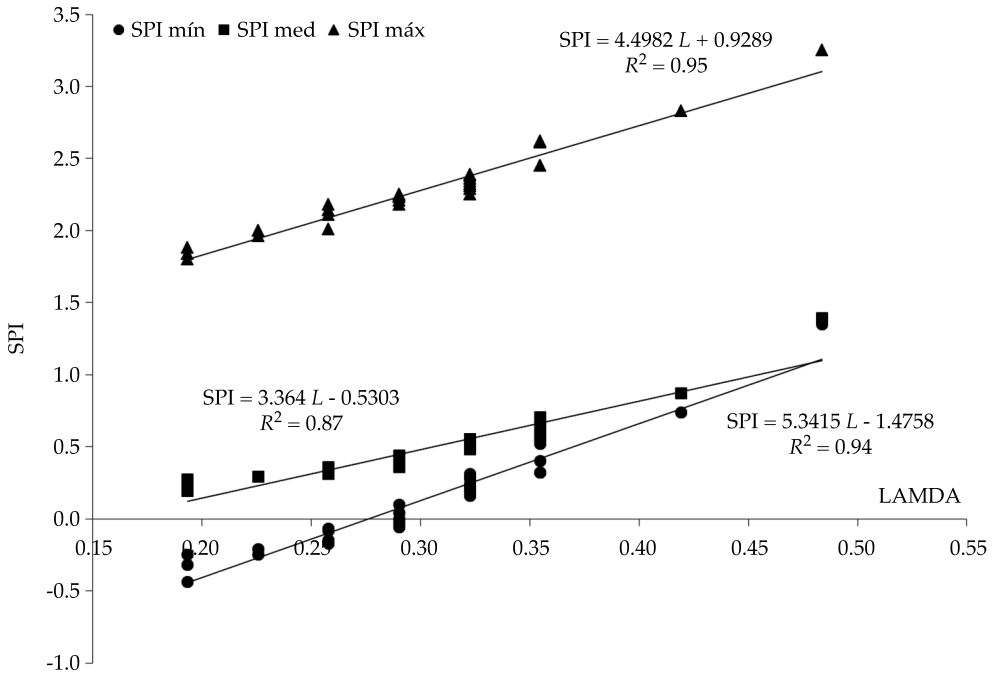


Figura 2. Correlación del índice de sequía SPI y el valor del parámetro λ del proceso compuesto Poisson-exponencial, para el mes de enero en el estado de Querétaro.

• ISSN 2007-2422

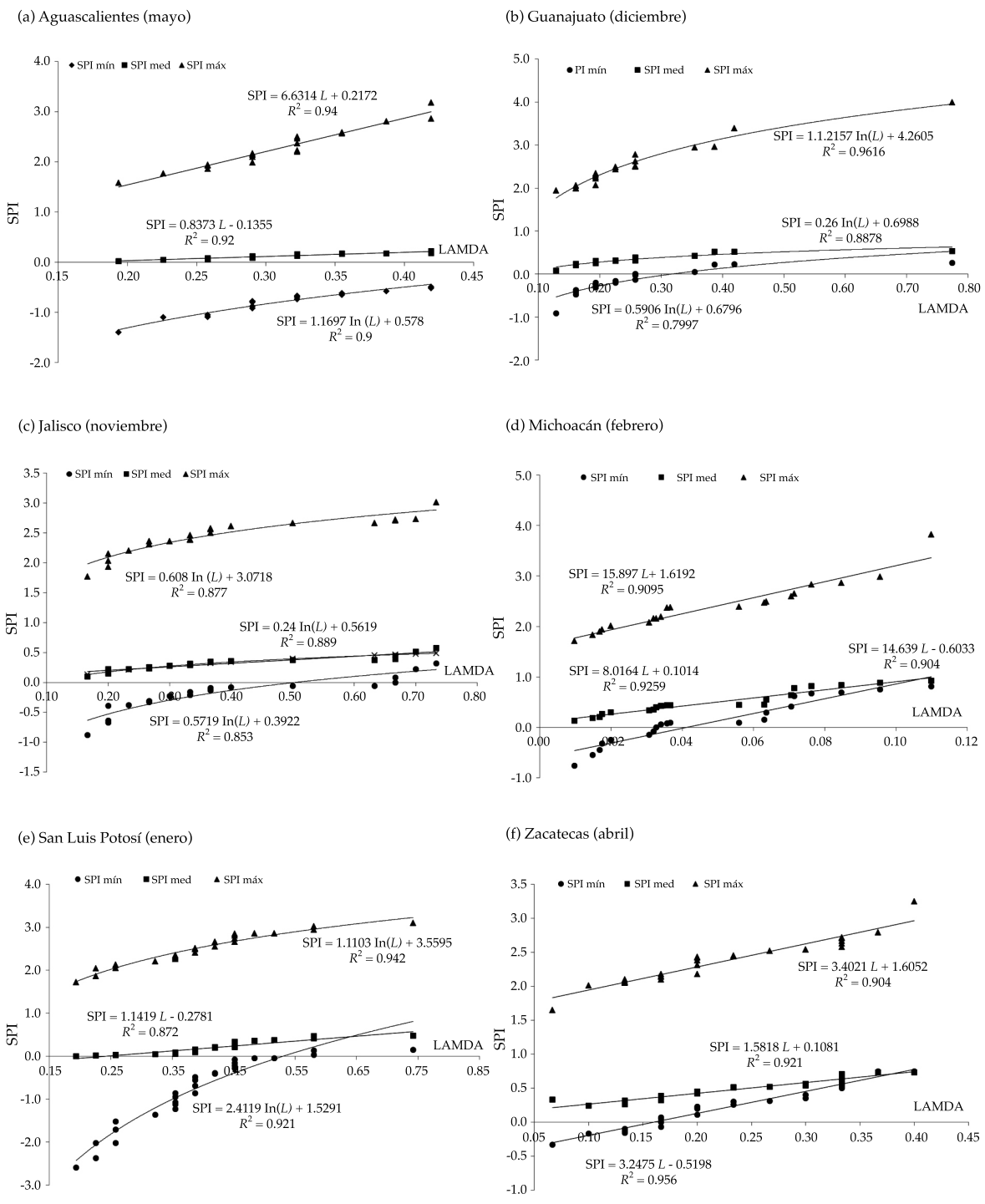


Figura 3. Correlación del índice de sequía SPI y el valor del parámetro λ del proceso compuesto Poisson-exponencial, para algunos de los meses más representativos de los estados analizados

ISSN 2007-2422

escasa precipitación en dicho periodo. Para un mes históricamente seco, como abril, la figura 3f muestra las condiciones mínima y máxima también muy próximas. Sin embargo, para los meses considerados dentro de la temporada extendida de lluvia (mayo y noviembre), inicio y final de la temporada, respectivamente (figuras 3a y 3c), los patrones en el ajuste de los valores de SPI y el valor del parámetro λ se observan bien definidos, y separadas las condiciones mínima y media. A continuación se estiman los valores del índice SPI* para cada uno de los estados seleccionados, en cada una de sus estaciones climatológicas. Estos resultados se muestran en los cuadros 3 y 4, en forma comparativa con el valor del SPI tradicionalmente calculado según McKee *et al*. (1993), y Edwards y McKee (1997). Se puede observar cómo en todos los casos, excepto uno, la condición de sequía es la misma. Cabe mencionar que si bien el valor calculado no es el mismo, una vez que se compara la condición de sequía resulta la misma (cuadro 2). Los resultados muestran que el cálculo del parámetro SPI* preserva la condición de sequía de un evento, tal que éste se inicia cuando se observa a través del tiempo, una tendencia marcada de valores negativos continuos del SPI. De esta manera, el evento de sequía termina cuando el valor del SPI alcanza valores positivos. Sin embargo, como puede in-

Cuadro 3. Condición de sequía para el estado de Querétaro, según la formulación tradicional del índice SPI y la comparación con el índice SPI* basado en el número de días de lluvia del mes de enero.

Clave	Estación	SPI (McKee *et al*., 1993; Edwards & McKee, 1997)		SPI* calculado (Poisson-exponencial, 2016)	
		SPI (medio)	Clasificación de la sequía	SPI* = 3.364*L* - 0.5303	Clasificación de la sequía
22001	Amealco, Amealco	0.195	Humedad cercana a la normal	0.121	Humedad cercana a la normal
22002	Ayutla, Arroyo Seco	0.198	Humedad cercana a la normal	0.121	Humedad cercana a la normal
22003	Cadereyta, Cadereyta	0.274	Humedad cercana a la normal	0.121	Humedad cercana a la normal
22004	El Batán, Corregidora	0.292	Humedad cercana a la normal	0.229	Humedad cercana a la normal
22006	El Pueblito, Corregidora	0.310	Humedad cercana a la normal	0.338	Humedad cercana a la normal
22008	Jalpan, Jalpan	0.320	Humedad cercana a la normal	0.338	Humedad cercana a la normal
22011	Pedro Escobedo	0.342	Humedad cercana a la normal	0.338	Humedad cercana a la normal
22012	Peñamiller, Peñamiller	0.356	Humedad cercana a la normal	0.338	Humedad cercana a la normal
22015	San Juan del Río (SMN)	0.359	Humedad cercana a la normal	0.446	Humedad cercana a la normal
22017	Tolimán, Tolimán	0.362	Humedad cercana a la normal	0.446	Humedad cercana a la normal
22018	Villa Corregidora	0.384	Humedad cercana a la normal	0.446	Humedad cercana a la normal
22029	Huimilpan, Huimilpan	0.484	Humedad cercana a la normal	0.555	Humedad cercana a la normal
22031	Presa Paso de Tablas, Teq.	0.502	Humedad cercana a la normal	0.555	Humedad cercana a la normal
22032	Presa Constitución, San Juan	0.506	Humedad cercana a la normal	0.555	Humedad cercana a la normal
22033	San Pablo, Amealco	0.514	Humedad cercana a la normal	0.555	Humedad cercana a la normal
22036	Arroyo Seco, Arroyo Seco	0.550	Humedad cercana a la normal	0.555	Humedad cercana a la normal
22042	La Llave, San Juan del Río	0.555	Humedad cercana a la normal	0.555	Humedad cercana a la normal
22045	Juriquilla, Querétaro	0.571	Humedad cercana a la normal	0.663	Humedad cercana a la normal
22046	Nogales, Colón	0.572	Humedad cercana a la normal	0.663	Humedad cercana a la normal
22047	Presa El Capulín, Amealco	0.637	Humedad cercana a la normal	0.663	Humedad cercana a la normal
22049	El Zamorano, Colón	0.707	Humedad cercana a la normal	0.663	Humedad cercana a la normal
22051	El Comedero, Peñamiller	0.873	Humedad cercana a la normal	0.880	Humedad cercana a la normal
22056	Higuerillas, Cadereyta	1.391	Muy húmedo	1.097	Moderadamente húmedo

• ISSN 2007-2422

Cuadro 4. Condición de sequía para el estado de Querétaro, según la formulación tradicional del índice SPI y la comparación con el índice SPI* basado en el número de días de lluvia del mes de mayo.

Clave	Estación	SPI (McKee *et al.*, 1993; Edwards & McKee, 1997)		SPI* calculado (Poisson-Exponencial, 2016)	
		SPI (mínimo)	Clasificación de la sequía	SPI* = 2.1631 Ln(L) + 1.1158	Clasificación de la sequía
22001	Amealco, Amealco	-2.070	Sequía excepcional	-2.103	Sequía excepcional
22002	Ayutla, Arroyo Seco	-1.720	Sequía extrema	-1.332	Sequía severa
22003	Cadereyta, Cadereyta	-1.650	Sequía extrema	-1.332	Sequía severa
22004	El Batán, Corregidora	-1.500	Sequía extrema	-1.125	Sequía moderada
22006	El Pueblito, Corregidora	-1.090	Sequía moderada	-1.125	Sequía moderada
22008	Jalpan, Jalpan	-1.050	Sequía moderada	-1.125	Sequía moderada
22011	Pedro Escobedo	-1.020	Sequía moderada	-1.125	Sequía moderada
22012	Peñamiller, Peñamiller	-0.970	Sequía moderada	-1.125	Sequía moderada
22015	San Juan del Río (SMN)	-0.840	Sequía moderada	-1.125	Sequía moderada
22017	Tolimán, Tolimán	-0.840	Sequía moderada	-1.054	Sequía moderada
22018	Villa Corregidora	-0.820	Sequía moderada	-0.937	Sequía moderada
22029	Huimilpan, Huimilpan	-0.810	Sequía moderada	-0.764	Sequía incipiente
22031	Presa Paso de Tablas, Teq.	-0.810	Sequía moderada	-0.764	Sequía incipiente
22032	Presa Constitución, San Juan	-0.780	Sequía incipiente	-0.764	Sequía incipiente
22033	San Pablo, Amealco	-0.750	Sequía incipiente	-0.764	Sequía incipiente
22036	Arroyo Seco, Arroyo Seco	-0.750	Sequía incipiente	-0.764	Sequía incipiente
22042	La Llave, San Juan del Río	-0.750	Sequía incipiente	-0.764	Sequía incipiente
22045	Juriquilla, Querétaro	-0.730	Sequía incipiente	-0.764	Sequía incipiente
22046	Nogales, Colón	-0.670	Sequía incipiente	-0.764	Sequía incipiente
22047	Presa El Capulín, Amealco	-0.660	Sequía incipiente	-0.604	Sequía incipiente
22049	El Zamorano, Colón	-0.610	Sequía incipiente	-0.604	Sequía incipiente
22051	El Comedero, Peñamiller	-0.580	Sequía incipiente	-0.604	Sequía incipiente
22056	Higuerillas, Cadereyta	-0.480	Humedad cercana a la normal	-0.454	Humedad cercana a la normal

tuirse, para una estimación exhaustiva de una condición de sequía o aridez se deben estimar otros índices empleando distintas variables, como precipitación, evapotranspiración, caudales en cauces naturales, niveles de lagos y embalses, niveles de acuíferos, etc. (Maity, Sharma, Nagesh-Kumar, & Chanda, 2013).

Conclusiones

La lluvia en el norte de la república mexicana es sin duda un fenómeno complejo de estudiar. Sin embargo, los resultados de la aplicación del proceso compuesto Poisson-exponencial en esta zona del país han permitido un conocimiento simple del fenómeno, a partir de sólo contar el número de días de lluvia. La Ley Fuga, como se le conoce, muestra ventajas. En un principio facilitó conocer la distribución espacial y temporal de la lluvia, a través de la obtención de los dos parámetros de la distribución, tal como lo demostraron Chulsang, Daeha, Tae-Woong y Kyu-Nam (2008). La sencillez de dichos parámetros permitió encontrar relaciones simples con su entorno geográfico y físico.

Se demuestra que el modelo propuesto es significativamente consistente con la descripción de los cambios asociados con los fenómenos extremos, pues permite identificar en una forma

ISSN 2007-2422

confiable la condición de sequía de una zona a través de la evolución del parámetro λ. Para la mejor aplicación del procedimiento propuesto se presenta el Anexo A, en donde se muestran el total de ecuaciones para los ocho estados analizados a lo largo del año. Las ecuaciones son muy sencillas y representan la variabilidad del fenómeno de sequía de 1960 a 2013. Es suficiente tener acceso a datos diarios de precipitación y realizar un análisis de frecuencia con la ecuación (4), estimando sus parámetros con las ecuaciones (5) a (10). A continuación se debe verificar la propiedad aditiva de los parámetros, según se propone en las ecuaciones (11) y (12). Por último, se cuenta el número de días con lluvia para el mes analizado; por ejemplo, seis días de lluvia promedio para el mes de enero en Amealco, Querétaro, esto es, $\lambda = 6/31 = 0.1936$, que sustituyendo este valor en la ecuación de SPI¨* media presentada en el Anexo A, se obtiene SPI* = 0.121, condición de sequía equivalente a "humedad cercana a la normal"; misma condición obtenida de la aplicación del cálculo tradicional del índice SPI. Es así como se considera que la metodología propuesta y el empleo del proceso compuesto Poisson-exponencial se adaptan a las necesidades de estimación del riesgo hidrológico y permiten profundizar en el conocimiento de la climatología regional del norte de la república mexicana.

Respecto a la comparación entre el índice SPI y el número de días con lluvia, se puede observar que el parámetro λ por sí solo representa de forma aceptable un riesgo de sequía y que permite obtener a través de una relación sencilla el índice tradicional de sequía SPI. El proceso compuesto Poisson-exponencial permite estimar de manera rápida y confiable un índice de sequía que en lo general es difícil estimar y sobre todo de interpretar. Cabe mencionar que estos índices de aridez suelen apreciarse también a través de diversas características fisiográficas o climatológicas de la región, como el potencial de evaporación (Arora, 2002).

Anexo A. Ecuaciones para el cálculo de la condición de sequía (SPI), empleando el número de días de lluvia λ.

		Aguascalientes	Estado de México	Guanajuato	Jalisco
Enero	Mín.	SPI = 2.1198 L - 1.067	SPI = 4.7697 L - 1.7198	SPI = 1.1772ln(L)+1.0521	SPI = 5.5132 L + 0.0094
	Med.	SPI = 0.9012 L - 0.0738	SPI = 3.6879 $L^{2.2191}$	SPI = 1.4797L - 0.2155	SPI = 14.028 L - 0.9193
	Máx.	SPI=5.0045 L+ 0.9168	SPI = 4.4137 $L^{0.5037}$	SPI = 1.1794ln(L) + 3.742	SPI = 23.337 L + 1.3916
Febrero	Mín.	SPI = 0.7793ln(L) +1.1632	SPI = 4.4369 L - 1.5511	SPI = 1.0051ln(L) +1.5377	SPI = 3.3928 L - 0.5588
	Med.	SPI = 0.392ln(L) + 0.9858	SPI = 2.4675 $L^{1.7621}$	SPI = 0.4616ln(L) + 1.111	SPI = 1.7774 $L^{0.8198}$
	Máx.	SPI = 6.7212 L + 0.7142	SPI = 1.265$e^{1.9999\ L}$	SPI = 1.4956ln(L) +4.7404	SPI = 3.3779 L + 1.5388
Marzo	Mín.	SPI = 3.6147 L - 0.1466	SPI = 1.1938 ln(L)+0.9374	SPI = 9.0688L - 1.9433	SPI = 0.6636 ln(L)+1.7166
	Med.	SPI = 2.5172 L + 0.2527	SPI = 2.5389 $L^{2.2154}$	SPI = 15.265$L^{2.3798}$	SPI = 0.5052 ln(L)+1.6211
	Máx.	SPI = 7.0078 L + 1.1569	SPI = 4.4326 $L^{0.5125}$	SPI = 15.769$L^{1.1779}$	SPI = 0.8193 ln(L)+4.0796
Abril	Mín.	SPI = 2.8415 L - 0.6699	SPI = 4.7189 L - 3.3246	SPI = 4.0933L - 1.6687	SPI = 3.9557 L - 0.6343
	Med.	SPI = 1.541 $L^{0.9242}$	SPI = 0.002$e^{7.7424\ L}$	SPI = 1.3071L - 0.1653	SPI = 2.7022 L - 0.055
	Máx.	SPI = 3.726 L + 1.2808	SPI = 0.9375$e^{1.6779\ L}$	SPI = 7.8405L + 0.1171	SPI = 1.9066 $e^{1.1295\ L}$
Mayo	Mín.	SPI = 1.1697ln(L) + 0.578	SPI = 3.4139 ln(L) -0.0745	SPI = 4.1397L - 2.7999	SPI = 4.19 L - 1.9891
	Med.	SPI = 0.8373 L - 0.1355	SPI = 0.4564 L - 0.2397	SPI = 0.6292L - 0.1684	SPI = 1.8807 $L^{2.1574}$
	Máx.	SPI = 6.6314 L + 0.2172	SPI = 2.2894 ln(L) + 2.93	SPI = 4.3293L + 0.3558	SPI = 1.4133 $e^{1.3361\ L}$
Junio	Mín.	SPI = 2.574ln(L) - 0.03	SPI = 3.8822 L - 4.6468	SPI = 8.0486L - 7.1462	SPI = 3.6454 ln(L) -0.1636
	Med.	SPI = 0.4708 L - 0.2181	SPI = 0.4265 L - 0.2984	SPI = 0.8645L - 0.5467	SPI = 0.3736 L - 0.2054
	Máx.	SPI = 3.8053 L - 0.1456	SPI = 0.4736$e^{1.8081\ L}$	SPI = 5.433L - 1.9128	SPI = 0.5287 $e^{2.0056\ L}$
Julio	Mín.	SPI = 3.756 L - 4.4262	SPI = 5.3854 L - 6.0263	SPI = 4.2992L - 4.8967	SPI = 6.7904 ln(L) -0.4224
	Med.	SPI = 0.4633 L - 0.32	SPI = 0.4932 L - 0.3623	SPI = 0.461L - 0.3249	SPI = 0.4645 L - 0.3521
	Máx.	SPI = 4.4924 $L^{1.9258}$	SPI = 2.8201 $L^{2.0036}$	SPI = 3.6083$L^{1.5825}$	SPI = 0.1669$e^{3.1715\ L}$
Agosto	Mín.	SPI = 2.7258 ln(L) -0.2203	SPI = 4.4066 L - 5.0641	SPI = 4.3371L - 4.6674	SPI = 3.8731 ln(L) -0.6868
	Med.	SPI = 0.3582 L - 0.1731	SPI = 0.4884 L - 0.3521	SPI = 0.4874L - 0.3086	SPI = 0.2748 L - 0.1795
	Máx.	SPI = 3.7586 $L^{1.2858}$	SPI = 0.8239$e^{1.2194\ L}$	SPI = 2.0734ln(L) +2.7367	SPI = 0.6461 $e^{1.6659\ L}$

• ISSN 2007-2422

Septiembre	Mín.	SPI = 2.6318 ln(L)+0.1261	SPI = 3.5855 ln(L) -0.7107	SPI = 4.1565L - 4.5179	SPI = 2.758 ln(L) + 0.9552
	Med.	SPI = 0.5114 L - 0.2193	SPI = 0.4904 L - 0.3476	SPI = $0.3862L^{7.2451}$	SPI = 1.1181 L - 0.4077
	Máx.	SPI = $3.5437\ L^{1.0853}$	SPI = 3.4947 ln(L)+2.8464	SPI = $2.9811L^{1.1275}$	SPI = 4.0283 L + 0.5607
Octubre	Mín.	SPI = 1.4517 ln(L) + 0.506	SPI = 1.562 ln(L) - 0.3399	SPI = 1.4285ln(L) +0.0708	SPI = 1.1693 ln(L) -0.3281
	Med.	SPI = $0.9981\ L^{2.2301}$	SPI = 0.3521 L - 0.121	SPI = 0.2338ln(L) +0.2811	SPI = 0.1354 ln(L)+0.1809
	Máx.	SPI = 3.7774 L + 0.6306	SPI = 1.5364 ln(L)+2.7965	SPI = 1.1913ln(L) +3.0004	SPI = $2.8101\ L^{0.3723}$
Noviembre	Mín.	SPI = 3.217 L - 0.9645	SPI = 1.4547 ln(L)+0.7965	SPI = 0.8591ln(L) +0.9083	SPI = 0.5719 ln(L)+0.3922
	Med.	SPI = 1.38 L - 0.0104	SPI = 1.003 L - 0.2136	SPI = 1.3032L - 0.0627	SPI = 0.24 ln(L) + 0.5619
	Máx.	SPI = $4.4486\ L^{0.4885}$	SPI = 1.1622 ln(L)+4.9147	SPI = 1.1702ln(L) +4.0784	SPI = 0.608 ln(L) + 3.0718
Diciembre	Mín.	SPI = 4.0484 L - 1.1414	SPI = 6.1976 L - 1.9903	SPI = 0.5906ln(L) +0.6796	SPI = 0.4932ln(L) +0.3827
	Med.	SPI = 1.883 L - 0.1188	SPI = $6.5009\ L^{2.4748}$	SPI = 0.26ln(L) + 0.6988	SPI = 0.1783ln(L) +0.5155
	Máx.	SPI = $4.1526\ L^{0.4682}$	SPI = $1.1834\ e^{2.6358\ L}$	SPI = 1.2157ln(L) +4.2605	SPI = 4.7815L + 0.9552

Anexo A. Ecuaciones para el cálculo de la condición de sequía (SPI), empleando el número de días de lluvia λ (continuación).

		Michoacán	Querétaro	San Luis Potosí	Zacatecas
Enero	Mín.	SPI = 18.513L - 1.118	SPI = 5.3415 L - 1.4758	SPI = 2.4119 ln(L) + 1.5291	SPI = 2.4463 L - 1.0427
	Med.	SPI = 8.6146L - 0.115	SPI = 3.364 L - 0.5303	SPI = 1.1419 L - 0.2781	SPI = $0.0921\ e^{3.2929\ L}$
	Máx.	SPI = 15.218L+ 1.7685	SPI = 4.4982 L + 0.9289	SPI = 1.1103 ln(L) + 3.5595	SPI = 3.1158 L + 1.5664
Febrero	Mín.	SPI = 14.639L - 0.6033	SPI = 1.2802 ln(L) + 2.0643	SPI = 1.8446 ln(L) + 1.5617	SPI = 0.6648 ln(L) + 1.022
	Med.	SPI = 8.0164L + 0.1014	SDI = 0.6274 ln(L) + 1.428	SPI = 0.3972 ln(L) + 0.7029	SPI = 0.3599 ln(L) + 0.9581
	Máx.	SPI = 15.897L + 1.6192	SPI = $5.8657\ L^{0.5826}$	SPI = 0.9402 ln(L) + 3.6397	SPI = 1.1444 ln(L) + 4.0017
Marzo	Mín.	SPI = 0.5979ln(L) +2.4724	SPI = 0.9164 ln(L) + 1.596	SPI = 2.1855 ln(L) + 2.1661	SPI = 0.842 ln(L) + 2.0056
	Med.	SPI = 12.293L + 0.1617	SPI = 0.5067 ln(L) + 1.2898	SPI = 2.187 L - 0.4009	SPI = 3.6414 L + 0.0453
	Máx.	SPI = 23.199L + 1.7119	SPI = 5.3723 L + 1.0837	SPI = 3.5904 L + 1.2149	SPI = 1.3176 ln(L) + 4.9408
Abril	Mín.	SPI = 6.176L + 0.0648	SPI = 5.2691 L - 2.0731	SPI = 6.0426 L - 2.8676	SPI = 3.2475 L - 0.5198
	Med.	SPI = 11.265L - 0.6988	SPI = $4.5624\ L^{2.6192}$	SPI = 1.2722 L - 0.2726	SPI = 1.5818 L + 0.1081
	Máx.	SPI = 11.981L + 1.9738	SPI = 5.2516 L + 0.3947	SPI = 3.1819 L + 1.2224	SPI = 3.4021 L + 1.6052
Mayo	Mín.	SPI = 5.3881L - 1.7338	SPI = 2.1631 ln(L) + 1.1158	SPI = 1.5886 ln(L) + 0.007	SPI = 1.4083 ln(L) + 1.1657
	Med.	SPI = 1.1792L - 0.0489	SPI = 1.1099 L - 0.311	SPI = 0.4205 L - 0.123	SPI = 1.22 L - 0.1845
	Máx.	SPI = 7.0514L + 1.1123	SPI = 3.1182 L + 0.6043	SPI = 2.405 L + 0.9533	SPI = $1.2642e^{1.9916\ L}$
Junio	Mín.	SPI = 0.6164L - 4.217	SPI = 4.1222 L - 3.4613	SPI = 4.557 L - 3.9842	SPI = 2.2934 ln(L) + 0.0825
	Med.	SPI = 0.0577L - 0.1919	SPI = 0.7549 L - 0.3397	SPI = 0.4759 L - 0.194	SPI = 0.5374 L - 0.2291
	Máx.	SPI = 0.4764L - 0.053	SPI = 2.8141 L + 0.3001	SPI = 3.3646 L + 0.3275	SPI = 3.0751 L + 0.3572
Julio	Mín.	SPI = 5.6131L - 4.7579	SPI = 2.346 ln(L) + 0.428	SPI = 3.4218 L - 3.5257	SPI = 2.6702 L - 3.062
	Med.	SPI = 0.4956L - 0.2288	SPI = 0.8609 L - 0.3636	SPI = 0.3977 L - 0.1827	SPI = 0.3136 L - 0.1519
	Máx.	SPI = 2.5988L + 0.5955	SPI = $3.2038\ L^{0.9948}$	SPI = 2.5079 L + 0.691	SPI = 3.2977 L + 0.33
Agosto	Mín.	SPI = 4.4194L - 3.8375	SPI = 2.1166 ln(L) + 0.4269	SPI = 3.0105L - 3.007	SPI = 2.1946 ln(L) - 0.1036
	Med.	SPI = 0.4546L - 0.1947	SPI = 0.7152 L - 0.2544	SPI = 0.3189L - 0.1069	SPI = 0.4546 L - 0.2063
	Máx.	SPI = $4.2408L^{1.0637}$	SPI = 3.1514 L + 0.2581	SPI = $1.0944e^{1.2427L}$	SPI = $3.1946\ L^{0.8452}$
Septiembre	Mín.	SPI = 2.9536ln(L) +0.8106	SPI = 3.6749 L - 3.066	SPI = 2.8075 L - 3.127	SPI = 1.7118 ln(L) - 0.1787
	Med.	SPI = 0.6012L - 0.225	SPI = $0.8371\ L^{3.9063}$	SPI = 0.3212 L - 0.1294	SPI = 0.4399 L - 0.1749
	Máx.	SPI = $5.0473L^{1.1496}$	SPI = 3.4711 L - 0.0141	SPI = 2.5281 L + 0.692	SPI = 1.3817 ln(L) + 2.9076
Octubre	Mín.	SPI = 1.9056ln(L) +1.5694	SPI = 1.487 ln(L) + 0.7302	SPI = 3.7443 L - 2.8359	SPI = 3.0948 L - 2.0169
	Med.	SPI = 0.9724L - 0.1336	SPI = 0.3526 ln(L) + 0.5312	SPI = $0.7301\ L^{2.7367}$	SPI = $0.7654\ L^{1.9607}$
	Máx.	SPI = 1.2109ln(L) + 3.904	SPI = 2.9386 L + 0.7578	SPI = 3.7117 L + 0.658	SPI = 4.6949 L + 0.4538
Noviembre	Mín.	SPI = 0.7781ln(L) +1.5378	SPI = 1.0301 ln(L) + 1.3444	SPI = 1.4483 ln(L) + 0.6895	SPI = 2.6008 L - 0.9177
	Med.	SPI = 0.2507ln(L) +0.8839	SPI = 0.3818 ln(L) + 0.9088	SPI = $1.8983\ L^{2.6655}$	SPI = 1.2978 L - 0.0566
	Máx.	SPI = 0.6232ln(L) +3.9355	SPI = $3.0197\ L^{0.2418}$	SPI = 0.9799 ln(L) + 3.6353	SPI = 3.4942 L + 1.3534
Diciembre	Mín.	SPI = 0.695ln(L) + 1.8087	SPI = 0.9637 ln(L) + 1.6571	SPI = 1.5359 ln(L) + 1.1605	SPI = 2.6381 L - 1.0126
	Med.	SPI = 5.3223L - 0.0089	SPI = 0.5204 ln(L) + 1.3119	SPI = 0.3778 ln(L) + 0.6587	SPI = $1.014\ L^{1.0007}$
	Máx.	SPI = 18.057L + 1.4411	SPI = 0.952 ln(L) + 3.807	SPI = 1.0866 ln(L) + 4.022	SPI = $4.088\ L^{0.5036}$

ISSN 2007-2422

Referencias

Arora, V. K. (2002). The Use of the Aridity Index to Assess Climate Change Effect on Annual Runoff. *Journal of Hydrology*, *265*(1-4), 164-177.

Babusiaux, C. (1969). *Etude statistique de la loi des fuites*. Thèse 3 eme cycle. Paris: Faculté des Sciences de Paris.

Bacchi, B., Becciu, G., & Kottegoda, N. (1994). Bivariate Exponential Model Applied to Intensities Y Durations of Extreme Rainfall. *Journal of Hydrology*, 155(1-2), 225-236.

Calder, I. R. (1986). A Stochastic Model of Rainfall Interception. *Journal of Hydrology*, 89(1-2), 65-71.

Cameron, D., Beven, K., & Tawn, J. (2000). An Evaluation of Three Stochastic Rainfall Models. *Journal of Hydrology*, *228*(1-2), 130-149.

Cammalleri, C., Micale, F., & Vogt, J. (2016). A Novel Soil Moisture-Based Drought Severity Index (DSI) Combining Water Deficit Magnitude and Frequency. *Hydrol. Process.*, *30*, 289-301, doi: 10.1002/hyp.10578.

Chulsang, Y., Daeha, K., Tae-Woong, K., & Kyu-Nam, H. (2008). Quantification of Drought Using a Rectangular Pulses Poisson Process Model. *Journal of Hydrology*, *355*, 34-48.

Coles, S., Pericchi, L., & Sisson, S. (2003). A Fully Probabilistic Approach to Extreme Rainfall Modeling. *Journal of Hydrology*, *273*(1-4), 35-50.

Conagua (2014). *Estadísticas del agua en México*. México, DF: Comisión Nacional del Agua. Recuperado de http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2014.pdf.

Eagleson, P. S. (1978). Climate, Soil, and Vegetation: 2. The Distribution of Annual Precipitation Derived from Observed Storm Sequences. *Water Resources Research*, *14*(5), 713-721.

Edwards, D. C., & McKee, T. B. (1997). *Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Time Scales* (155 pp.). Paper No. 634. Climatology Report No. 97-2. Fort Collins, USA: Colorado State University. Department of Atmospheric Science.

Escalante, C., & Reyes, L. (2002). *Técnicas estadísticas en hidrología* (298 pp.). México, DF: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM.

Govindaraju, R. (2013). Special Issue on Data-Driven Approaches to Droughts. *J. Hydrol. Eng.*, 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000812, 735-736.

Gutiérrez-López, A., Descroix, L., & Lebel, T. (2002a). *Rainfalls Regionalisation, in North Mexico generating Regional Vectors*. Conference on Water Resources Planning and Management and Symposium on Managing the Extremes-Floods and Droughts, ASCE, EWRI, Roanoke, Virginia, USA.

Gutiérrez-López, A., Lebel, T., & Descroix, L. (2002b). *Statistical Analysis for Modelling the Hydrological Risk in Northern Mexico*. International Association for Hydraulic Research (IAHR) Hydraulic and Hydrological Aspects of Reliability and Safety of Hydraulic Structures, St. Petersburg, Russia.

Gutiérrez-López, A., Lebel, T., & Mejía, R. (2005). Estudio espacio-temporal del régimen pluviométrico en la zona meridional de la Rep. Mexicana. *Ingeniería Hidráulica en México*, 20(1), 57-65.

Hayes, M. (2000). *Drought Indices*. Recuperado de http://www.drought.unl.edu/dm/archive/99/classify.htm.

Hughes, R. (2003). On Detecting Anomalous Behaviour in Runs. *Journal of Hydrology*, *278*(1-4), 253-266.

Karamouz, M., Rasouli, K., & Nazif, S. (2009). Development of a Hybrid Index for Drought Prediction: Case Study. *J. Hydrol. Eng.*, 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000022, 617-627.

Kim, T., Valdés, J., & Yoo, C. (2006). Nonparametric Approach for Bivariate Drought Characterization Using Palmer Drought Index. *J. Hydrol. Eng.*, 10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:2(134), 134-143.

Le Barbé, L., & Lebel, T. (1997). Rainfall Climatology of the HAPEX-Sahel Region during the Years 1950-1990. *Journal of Hydrology*, *188-189*(1-4), 43-73.

Le Barbé, L., Lebel, T., & Tapsoba, D. (2002). Rainfall Variability in West Africa during the Years 1950-1990. *Journal of Climate*, *15*(2), 187-202.

Lebel, T., Taupin, J., & D'Amato, N. (1997). Rainfall Monitoring during HAPEX-Sahel. 1. General rainfall conditions and climatology. *Journal of Hydrology*, *188-189*(1-4), 74-96.

Lebel, T., & Le Barbé, L. (1997). Rainfall Monitoring during HAPEX-Sahel. 2. Point and Areal Estimation at the Event and Seasonal Scales. *Journal of Hydrology*, *188-189*(1-4), 97-122.

Liu, L., Hong, Y., Looper, J., Riley, R., Yong, B., Zhang, Z., Hocker, J., & Shafer, M. (2013). Climatological Drought Analyses and Projection Using SPI and PDSI: Case Study of the Arkansas Red River Basin. *J. Hydrol. Eng.*, 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000619, 809-816.

López-Segovia, L., Villaseñor-Alva, J., & Vaquera-Huerta, H. (2002). Dos pruebas de bondad de ajuste para procesos de Poisson no homogéneos. *Revista Agrociencia*, *36*, 703-712.

Maity, R., Sharma, A., Nagesh-Kumar, D., & Chanda, K. (2013). Characterizing Drought Using the Reliability-Resilience-Vulnerability Concept. *J. Hydrol. Eng.*, 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000639, 859-869.

McKee, T., Doesken, N., & Kleist, J. (1993). *Drought Monitoring with Multiple Time Scales. American Meteorological Society* (pp. 233-236). 9th Conference on Applied Climatology.

Mirakbari, M., Ganji, A., & Fallah, S. (2010). Regional Bivariate Frequency Analysis of Meteorological Droughts. *J. Hydrol. Eng.*, 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000271, 985-1000.

NDMC (2003). *National Drought Mitigation Center. NDMC web-site*. University of Nebraska at Lincoln. Recovered from www.drought.unl.edu.

Onof, C., & Wheater, H. (1994). Improvements to the

Modelling of British Rainfall Using a Modified Ryom Parameter Bartlett-Lewis Rectangular Pulse Model. *Journal of Hydrology*, *157*(1-4), 177-195.

Palmer, W. C. (1965). *Meteorological Drought* (58 pp.). Research Paper No. 45. Washington, DC: US Department of Commerce, Weather Bureau.

Pandey, G., & Nguyen, V. (1999). A Comparative Study of Regression Based Methods in Regional Flood Frequency Analysis. *Journal of Hydrology*, *225*(1-2), 92-101.

Pita, M. (2003). *Un nouvel indice de sécheresse pour les domaines méditerranéens. Application au bassin du Guadalquivir (sud-ouest de l'Espagne)* (pp. 225-234). Vol. 13. Nice: Association Internationale de Climatologie.

Ribstein, P. (1983). Loi des fuites. *Cahiers, Orstom, série Hydrologie*, 20(2), 117-141.

Rodríguez-Iturbe, I. (1986). Scale of Fluctuation of Rainfall Models. *Water Resources Research*, 22(9), 15s-37s.

Saporta, G. (1990). *Probabilités, analyse des données et statistique* (493 pp.). Paris: Editions Technip.

Sharma, T. (1996). Simulation of the Kenyan Longest Dry *y* Wet Spells *y* the Largest Rain-Sums using a Markov Model. *Journal of Hydrology*, 178(1-4), 55-67.

Sivapalan, M., & Blöschl, G. (1998). Transformation of Point Rainfall to Areal Rainfall: Intensity-Duration-Frequency Curves. *Journal of Hydrology*, *204*(1-4), 150-167.

Sohrabi, M., Ryu, J., Abatzoglou, J., & Tracy, J. (2015). Development of Soil Moisture Drought Index to Characterize Droughts. *J. Hydrol. Eng.*, 10.1061/(ASCE) HE.1943-5584.0001213, 04015025.

Soľáková, T., De Michele, C., & Vezzoli, R. (2014). Comparison between Parametric and Nonparametric Approaches for the Calculation of Two Drought Indices: SPI and SSI. *J. Hydrol. Eng.*, 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000942, 04014010.

Tapsoba, D. (1997). *Caracterisation evenementielle des regimes pluviometriques Ouest Africains et de leur recent changement*. Th. D. Paris: Université de Paris XI (Orsay).

Wilks, D. S. (1998). Multisite Generalization of a Daily Stochastic Precipitation Generation Model. *Journal of Hydrology*, 210(1-4), 178-191.

Wong, G., Lambert, M. F., Leonard, M., & Metcalfe, A. V. (February, 2010). Drought Analysis Using Trivariate Copulas Conditional on Climate States. *Journal of Hydrologic Engineering*, *15*(2), 129-141.

Información institucional de los autores

Dr. M. Alfonso Gutiérrez-López

Universidad Autónoma de Querétaro
Centro de Investigaciones del Agua, CIAQ
Cerro de las Campanas, s/n, Col. Las Campanas
76010 Querétaro, Querétaro, México
Teléfono: +52 (442) 1921 200, extensión 6401
alfonso.gutierrez@uaq.mx

Dr. José Leopoldo Vargas Baecheler

Universidad de Concepción
Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM)
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil
Edmundo Larenas 219 Oficina 422a, Chile
Teléfono: +56 (41) 2204 764
Fax: +56 (41) 2207 089
jvargas@udec.cl

Ing. Víctor Reséndiz Torres

Universidad Autónoma de Querétaro
Centro de Investigaciones del Agua, CIAQ
Cerro de las Campanas, s/n, Col. Las Campanas
76010 Querétaro, Querétaro, México
Teléfono: +52 (442) 1921 200, extensión 6038
valfonso.resendizt89@hotmail.com

Ivonne Cruz Paz

Universidad del Valle de México, Campus Querétaro
División de Negocios, Humanidades y Sociales
Blvd. Juriquilla 1000-A, Del. Santa Rosa Jáuregui
76230 Santiago de Querétaro, Querétaro, México
ifilacphi@uaq.mx

Haga clic aquí para escribir al autor

ISSN 2007-2422

Obteniendo agua durante una sequía en el pozo Tetitlán, Zitlala, Guerrero, 25 de abril de 2014.

Foto: José Luis Martínez Ruiz.

La sequía de la península de Yucatán

• Héctor Estrada-Medina* • Víctor Cobos-Gasca •
Universidad Autónoma de Yucatán, México
*Autor para correspondencia

• José Luis Acosta-Rodríguez • Sergio Peña Fierro •
Comisión Nacional del Agua, México

• Mariela Castilla-Martínez • Claudia Castillo-Carrillo • Santiago Franco-Brito •
• Diana López-Castillo • Mariana López-Díaz • Wendy Luna-Flores •
• Andrés Maldonado-Repetto • Oscar Álvarez-Rivera •
• José Luis Cámara-Romero • Andrés Morales-Guadarrama •
• Ana María Moreno-Arjona • Biiniza Pérez-Niño • Pamela Rodríguez-Lara •
• Rosa Linda Zapata-Luna •
Universidad Autónoma de Yucatán, México

Resumen

Estrada-Medina, H., Cobos-Gasca, V., Acosta-Rodríguez, J. L., Peña-Fierro, S., Castilla-Martínez, M., Castillo-Carrillo, C., Franco-Brito, S., López-Castillo, D., López-Díaz, M., Luna-Flores, W., Maldonado-Repetto, A., Álvarez-Rivera, O., Cámara-Romero, J. L., Morales-Guadarrama, A., Moreno-Arjona, A. M., Pérez-Niño, B., Rodríguez-Lara, P., & Zapata-Luna, R. L. (septiembre-octubre, 2016). La sequía de la península de Yucatán. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(5), 151-165.

La sequía es uno de los fenómenos naturales más difíciles de estudiar debido a que no se cuenta con una definición lo suficientemente clara ni con los recursos técnicos para poder predecirla. Es un problema que, en el mundo, se ha incrementado en las últimas décadas como consecuencia del cambio climático. En México, la sequía afecta a más personas que cualquier otra contingencia natural, por lo que se requiere estudiarla para poder prevenir y mitigar sus efectos. En la península de Yucatán (PY), zona privilegiada por tener un vasto manto acuífero, la sequía no se presenta de manera tan catastrófica como en otros estados de la república. La sequía produce pérdidas y bajo rendimiento de cultivos, cabezas de ganado y colmenas, disminución de la calidad de los productos, así como incremento en los costos de producción, lo que produce reducción en el ingreso de los productores. A nivel de los organismos operadores no se registra baja en la disponibilidad de agua durante la época de sequía y sólo se reporta su disminución para consumo humano en algunas localidades en donde el acuífero se encuentra muy profundo o la calidad natural del agua no es adecuada para consumo humano. Sin embargo, al depender la PY casi en su totalidad del acuífero para el abasto del agua, su disponibilidad podría disminuir súbitamente por problemas en la infraestructura del sistema operador o de contaminación (importante por la permeabilidad del sustrato geológico y porque no existen sistemas de drenaje y potabilización de agua suficientes).

Palabras clave: disponibilidad de agua, sequía operativa, estiaje.

Abstract

Estrada-Medina, H., Cobos-Gasca, V., Acosta-Rodríguez, J. L., Peña-Fierro, S., Castilla-Martínez, M., Castillo-Carrillo, C., Franco-Brito, S., López-Castillo, D., López-Díaz, M., Luna-Flores, W., Maldonado-Repetto, A., Álvarez-Rivera, O., Cámara-Romero, J. L., Morales-Guadarrama, A., Moreno-Arjona, A. M., Pérez-Niño, B., Rodríguez-Lara, P., & Zapata-Luna, R. L. (September-October, 2016). The Drought of the Yucatan Peninsula. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 7(5), 151-165.*

Drought is one of the most difficult natural phenomena to study because there is not yet a clear enough definition nor the technical resources to predict it. However, it is a problem that has increased worldwide in recent decades, perhaps influenced by climate change. In Mexico, drought affects more people than any other natural contingency, so it is necessary to study it to prevent or mitigate its effects. The Yucatan Peninsula, a privileged area with a vast aquifer, drought is not as severe as in other states of México. Drought in the Yucatan Peninsula produces lost or reduction of crop, livestock and hives yields, as well as a reduction of the quality of the products and an increment of the production costs, which promotes a decrease in the producers income. Regarding the operator organisms, there are not reductions on water availability during drought events, water is scarce only in some areas where the aquifer is very deep or the natural quality of the water is not adequate for human consumption. However, since the Yucatan Peninsula depends of the aquifer for water provision, water availability may suddenly decrease due to infrastructure problems of the operator system or contamination (important because the high permeability of the geologic substrate and the lack of drainage and purification systems).

***Keywords**: Water availability, operative drought, dry season.*

Recibido: 19/08/2015
Aceptado: 08/02/2016

Introducción

La sequía se puede definir como un periodo prolongado de disminución o ausencia de la precipitación pluvial, que afecta las actividades humanas (Escobar, 1997; Contreras, 2005). Se presenta de forma lenta y es poco notoria, por lo que puede considerarse un fenómeno no violento, a diferencia de otros eventos naturales, como una inundación o un huracán, pero sus efectos negativos comienzan a afectar la agricultura, ganadería e industria al prolongarse su duración (García-Prats, 2006). La sequía es uno de los fenómenos naturales más difíciles de estudiar debido a que aún no cuenta con una definición lo suficientemente clara ni con los recursos técnicos necesarios para poderla predecir. Sin embargo, es un problema que se ha incrementado en las últimas décadas, quizá influenciado por el cambio climático (FAO, 2009).

En la península de Yucatán (PY), por ser una zona privilegiada con un vasto manto acuífero, no se presenta la sequía de manera tan severa como en otros estados de la república mexicana. Los efectos de la sequía se destacan principalmente en agricultura y ganadería, y sólo se reporta disminución en la disponibilidad de agua para consumo humano en algunas localidades en donde el acuífero se encuentra muy profundo o la calidad natural del agua no es adecuada para el consumo humano (Conagua, 2014).

Sin embargo, como consecuencia de las sequías registradas en los últimos años en estados del norte de México, el gobierno federal puso en marcha el Pronacose (Programa Nacional contra la Sequía), a través del cual se busca prevenir, mitigar y revertir los efectos de la sequía a nivel nacional. En este sentido, a través de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) se instauró que cada Consejo de Cuenca a nivel nacional contara con un Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía (PMPMS).

En 2013 se realizó el PMPMS para el Consejo de Cuenca Península de Yucatán, el cual tuvo como objetivo identificar y establecer las medidas preventivas y de mitigación de la sequía en la cuenca, para promover la participación informada de la población y reducir la vulnerabilidad ante este fenómeno.

Materiales y métodos

Zona de estudio

La PY se localiza al sureste de la república mexicana (19° 40′, 21° 37′ N y 87° 30′, 90° 26′ E) y abarca una superficie aproximada de 140 000 km^2 (Schmitter-Soto *et al*., 2002; & Duno-de Stefano, Can-Itza, Rivera-Ruiz, & Calvo-Irabién, 2012); está conformada administrativamente por tres estados: Campeche (11 municipios), Quintana Roo (10 municipios) y Yucatán (106 municipios) (figura 1).

La vegetación de la PY es en su mayoría selva baja caducifolia, y en menor medida selva baja espinosa, selvas altas y medianas subperennifolias y perennifolias, manglar, matorral de duna costera, petén y sabana (Flores & Espejel, 1994).

La región tiene una temperatura media anual de 26 °C, con una diferencia de temperatura entre el mes más frío y el más caliente de entre 5 y 6 °C; la precipitación presenta un gradiente que va de 450 mm en el litoral norte hasta 1 500 mm en la parte más al sur de la PY (Vidal-Zepeda, 2005).

La PY es una estructura geológica que corresponde a una plataforma de rocas sedimentarias, con un grosor de más de 3 500 m, que descansan sobre un basamento paleozoico; la constitución geológica de la superficie de la PY es en su totalidad de rocas sedimentarias marinas (calizas y derivadas), cuyas edades abarcan del Paleoceno al Cuaternario (Lugo-Hubp, Aceves-Quesada, & Espinasa-Pereña, 1992).

En la PY, las asociaciones de suelo con mayor extensión son leptosoles 67.94% (anteriormente rendzinas y/o litosoles), en zonas cársticas recientes y juveniles; gleysoles, 15.25%, en zonas costeras; luvisoles, 4.40%, en planicies cársticas maduras; vertisoles, 2.99%, al sur y noreste; solonchak, 2.42% en la costa; regosol (2.29%) e histosol (0.58%), en litoral y planicie costera (Conagua, 2014).

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 151-165
• ISSN 2007-2422

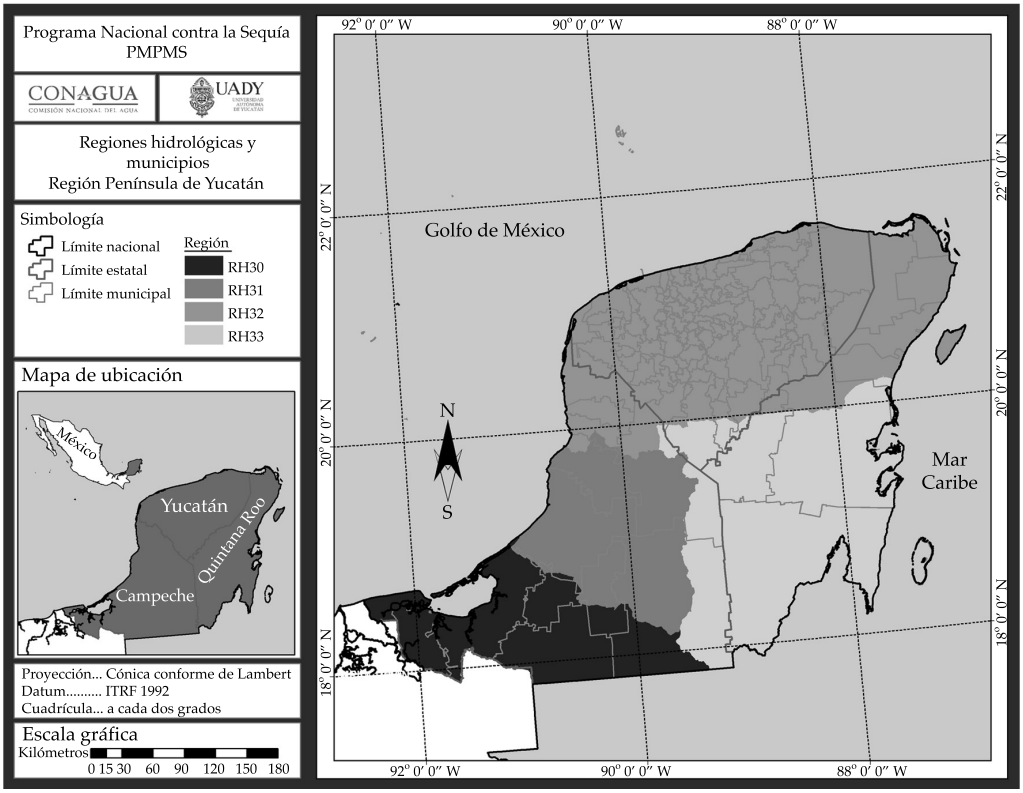


Figura 1. Mapa de localización de la península de Yucatán y regiones hidrológicas (RH). Fuente: Conagua, 2014.
Fuente: PMPMS-CCPY (Conagua, 2014).

Una característica importante de la PY es la ausencia de corrientes superficiales; de la porción norte hacia el sur sólo se manifiesta un drenaje incipiente que desaparece en resumideros o en cuerpos de agua superficiales o aguadas (Bautista-Zúñiga, Palma, & Huchin, 2005). El agua de la lluvia se evapora, es absorbida por plantas y suelo, y se infiltra en el subsuelo. Según el Anuario Estadístico de Campeche (INEGI, 2012), esta entidad cuenta con 50 corrientes de agua y 28 cuerpos de agua. El Anuario Estadístico de Quintana Roo (INEGI, 2011) reporta 10 corrientes de agua y seis cuerpos de agua (19 lagunas y un estero), y para Yucatán se tiene ausencia total de corrientes superficiales y seis cuerpos de agua (cuatro esteros y dos lagunas) (INEGI, 2010).

La recarga natural del acuífero de la PY es de 25 310.70 Hm^3/año. Descontando la descarga natural comprometida (17 341.60 Hm^3/año) y el volumen concesionado (3 413.64 Hm^3/año), deja una disponibilidad de agua de 4 560.44 Hm^3/año (DOF, 2013). La disponibilidad media per cápita a 2012 fue de 6 874 m^3 por habitante por año (Conagua, 2013).

La topografía de la PY presenta como rasgo sobresaliente cuerpos de agua denominados cenotes, cuyo origen se debe al proceso denominado karstificación, que consiste en la combinación de mecanismos de disolución, colapso y neoformación de la caliza. Estos procesos están regidos por factores internos (litología, grado de porosidad y fractura de la roca) y externos (clima, temperatura, vegetación, mezcla de agua dulce y salada), los cuales actúan en diferentes escalas de tiempo, dando como resultado muchas formas kársticas y diferentes grados de karstificación. Se estima que en Yucatán existen

ISSN 2007-2422

entre 7 000 y 8 000 cenotes (Beddows, Blanchon, Escobar, & Torres-Talamante, 2007).

Para el desarrollo del PMPMS para la PY se realizaron tres actividades principales, que consistieron en la caracterización y el diagnóstico del estado de la sequía; identificación de medidas de prevención y mitigación de la sequía, y elaboración de una propuesta de acción ante la sequía para el Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán.

Caracterización y diagnóstico de la sequía

Para llevar a cabo la caracterización y el diagnóstico de la sequía se realizó un análisis histórico de este fenómeno, en donde se revisaron los archivos oficiales de las dependencias involucradas en la sequía (Sagarpa, Conagua), registros hemerográficos del diario de circulación más importante en la PY (*Diario de Yucatán*) de los últimos 50 años, para identificar la ocurrencia de eventos de sequía. Sólo se analizaron los registros encontrados entre los meses de marzo a mayo (periodo final de la época de secas) y de julio a agosto (periodo donde usualmente se presenta la canícula).

Se realizaron análisis de los registros históricos de los caudales observados en las estaciones hidrométricas estratégicas de la Conagua de los principales ríos de la PY: Palizada, Mamantel, Champotón y Candelaria en el estado de Campeche. Cabe mencionar que en el estado de Yucatán no existen ríos y en el estado Quintana Roo se encuentra el río Hondo, pero no hay datos disponibles de su caudal.

Se recopilaron y analizaron los datos meteorológicos históricos de precipitación para el periodo 1982-2013, y de temperatura para diferentes periodos de 66 estaciones climatológicas en el estado de Yucatán (1962-2012); 51 en Campeche (1944-2012), y 43 en Quintana Roo (1952-2013), con los cuales se obtuvieron valores promedio. A partir de este análisis se hicieron interpolaciones con el programa *GS+* (Gamma Design, USA) para después generar los mapas en *ARCGIS 10.1* (ESRI, USA) en históricos del promedio de la precipitación anual y promedio de temperatura máxima anual histórica de la PY (1982-2013), así como los mapas históricos del promedio de temperaturas máximas por periodos: mayo-octubre, lluvias; noviembre-abril, secas; marzo-mayo, fin de la época de secas; junio-agosto, canícula.

Además se realizó el cálculo del índice de precipitación estandarizado (SPI, por sus siglas en inglés), para identificar la intensidad de la sequía en la PY. El SPI es empleado en Estados Unidos por el Centro Climático de Colorado, el Centro Climático Regional del Oeste y el Centro Nacional para la Mitigación de la Sequía (McKee, Doesken, & Kleist, 1993).

El SPI representa el número de desviaciones estándar que cada uno de los registros evaluados de precipitación se desvía del promedio histórico. Todos los registros de precipitación superiores al promedio histórico del mes evaluado resultan en un valor de SPI positivo, mientras que registros de precipitación menores al promedio histórico del mes evaluado toman un valor de SPI negativo (McKee *et al*., 1993). Para el cálculo del SPI se utilizó el programa *SPI_sl_6*, el cual se encuentra disponible en la página del Centro Nacional para la Mitigación de la sequía de Estados Unidos (National Drought Mitigation Center): http://drought.unl.edu/MonitoringTools/DownloadableSPIProgram.aspx.

Con los valores obtenidos del SPI se clasificó a la sequía en cinco categorías: anormalmente seco (D0), sequía moderada (D1), sequía severa (D2), sequía extrema (D3) y sequía excepcional (D4) (cuadro 1). Dicha clasificación está relacionada con la clasificación de la Intensidad de la Sequía del Monitor de Sequía de América del Norte (NADM), en donde se presenta una descripción del tipo de sequía que se presenta con base en el déficit de agua.

Se analizaron los datos de SPI calculados para 85 estaciones meteorológicas de la PY (29 en Campeche, 18 en Quintana roo y 38 en Yucatán). Para cada estación se determinó el valor de SPI

• ISSN 2007-2422

Cuadro 1. Intervalos de SPI para cada tipo de sequía.

Categoría	Clasificación	SPI
D0	Anormalmente seco	-0.50 a -0.99
D1	Sequía moderada	-1.00 a -1.49
D2	Sequía severa	-1.50 a -1.99
D3	Sequía extrema	-2.00 a -2.49
D4	Sequía excepcional	-2.50 o menor

Fuente: modificado de Giddings, Soto, Rutherford y Maarouf, 2005.

más negativo por mes y por año, se le asignó su categoría de sequía y se analizó el número de estaciones que registraron una misma categoría de sequía como la sequía más severa en un mes o año determinado.

Finalmente, para la elaboración del mapa de vulnerabilidad de la región Hidrológico-Administrativa XII Península de Yucatán se utilizaron los valores normalizados a nivel municipal de los siguientes indicadores: 1. Grado de exposición (brecha hídrica y frecuencia de sequías); 2. Sensibilidad (población, valor agregado censal bruto (VABC), superficie cultivada por municipio e índice de marginación), y 3. Capacidad de adaptación (altitud y calidad del agua). Para la normalización de los datos se empleó la ecuación (1):

$$Z_j \text{ normalización} = \frac{Z_j - Z_{\text{mín}}}{Z_{\text{máx}} - Z_{\text{mín}}} \qquad (1)$$

donde:
Z_j = valor del indicador para el municipio *j*.
$Z_{\text{mín}}$ y $Z_{\text{máx}}$ = valores mínimo y máximo observados del indicador para el municipio *j*.

Medidas de prevención y mitigación de la sequía

Para identificar las medidas de prevención y mitigación a la sequía para la PY se realizaron talleres participativos con representantes de los sectores de usuarios del consejo de cuenca de la PY (acuícola, agrícola, industrial, pecuario, público urbano, de servicios y de temporal tecnificado), así como los comités de la sociedad organizada (ambiental, equidad y género, indígena, forestal, academia e investigación).

En las reuniones realizadas con representantes de cada uno de estos sectores se expusieron diferentes medidas generales y más particulares, mismas que fueron evaluadas, categorizadas y priorizadas tanto en medidas preventivas como de mitigación a corto y largo plazos.

También se llevaron a cabo reuniones con representantes de las diferentes dependencias públicas relacionadas con la sequía, como son Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP), Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol), Secretaría de Energía (Sener), Secretaría de Economía (SE), Secretaría de Salubridad y Asistencia (SSA), y Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa).

Protocolo de alertamiento en caso de sequía

Se elaboró un protocolo de alertamiento sugerido ante la presencia de un fenómeno de sequía, en el que se tienen las actividades a realizar según el momento, los productos a obtener, así como la dependencia o actores encargados de llevar a cabo la acción. Para su elaboración se tomó como referencia el protocolo de alertamiento para condiciones meteorológicas y/o hidrológicas severas de la Conagua-Organismo de Cuenca Península de Yucatán.

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 151-165
ISSN 2007-2422

Resultados y discusión

Caracterización y diagnóstico de la sequía

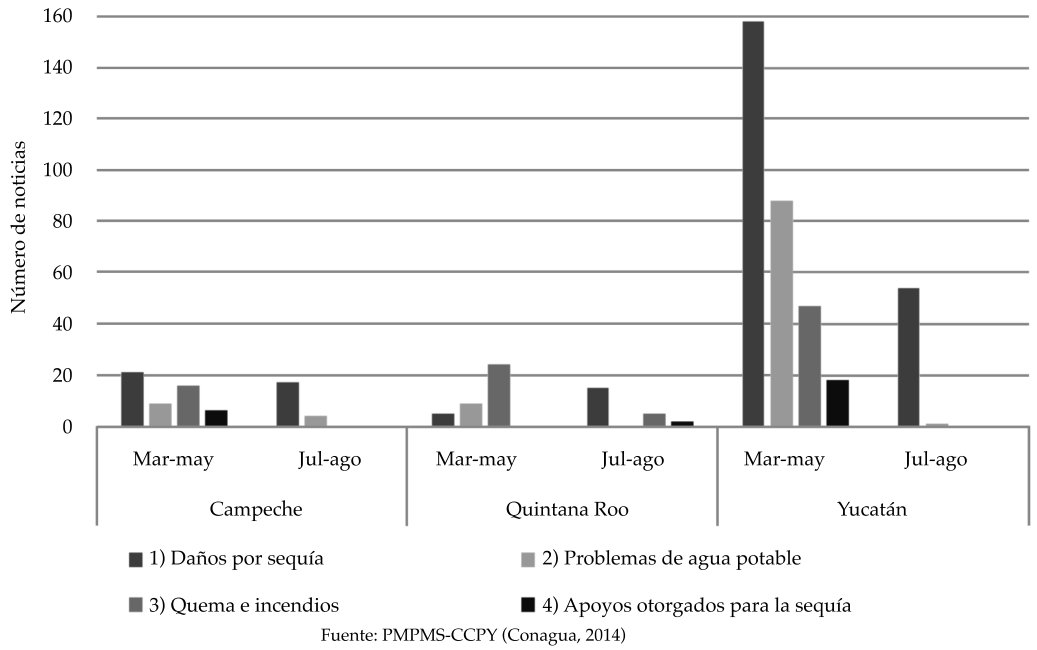
En total, de 2005 a 2009 ha habido siete declaratorias oficiales de sequía publicadas en el *Diario Oficial de la Federación* (DOF): dos para Campeche (DOF, 2004a; DOF, 2007); dos para Quintana Roo (DOF, 2004b; DOF, 2004c), tres para Yucatán (DOF, 2008; DOF, 2009a, 2009b). Antes de 2005 no había declaratorias oficiales de sequía; sin embargo, hay diversas fuentes que documentan la existencia de episodios de sequía en la PY durante el siglo XIX (Me-Bara & Valdéz, 2003; Contreras, 2005; Mendoza, García-Acosta, Velasco, Jáuregui, & Díaz-Sandoval, 2007). Los daños de los episodios de sequía declarados oficialmente se documentan en el cuadro 2. De 2013 a 2015 no se han hecho declaraciones de sequía en ninguno de los tres estados de la PY; empero, las fuentes no oficiales han registrado la problemática que han percibido los usuarios.

En los registros hemerográficos se observó que el mayor número de noticias relacionadas con los daños por la sequía se registraron en el periodo marzo a mayo y que el estado de la PY con más registros de noticias asociadas con sequía es el estado de Yucatán (figura 2).

Cuadro 2. Reporte de daños de la sequía por estado.

Estado afectado	Año	Productores afectados	Áreas de cultivo afectadas (has)	Unidades animales	Total en millones de pesos
Campeche	2005	9 905	ND	ND	7.4
Campeche	2007	9 169	23 955.0	ND	19.7
Yucatán	2008	11 238	11 639.1	ND	30.3
Yucatán	2009	1 482	ND	9 666	86.3
Quintana Roo	2009	18 354	7 847.1	ND	7.1

ND: no determinado. Fuente: elaboración propia con datos de Cenapred, 2009, y Sagarpa, 2010.



Fuente: PMPMS-CCPY (Conagua, 2014)

Figura 2. Frecuencia de noticias relacionadas con la sequía en la península de Yucatán en los periodos marzo-mayo (fin de la época de secas) y julio-agosto (canícula) de 1962 a 2012.

• ISSN 2007-2422

De los ríos de la PY con los que se cuenta datos de caudal, el Palizada es el que presenta mayor caudal (figura 3a), seguido del Candelaria (figura 3d), Champotón (figura 3b) y Mamantel (figura 3c). El análisis de los registros históricos de los caudales de los ríos estudiados revela que los promedios mensuales de los caudales registrados en las estaciones hidrométricas de los ríos Mamantel, Palizada y Champotón de 1953 a 2012 muestran un comportamiento similar relacionado con la estacionalidad de la lluvia (datos no presentados). Los meses con menos caudal son de marzo a mayo (fin de la época de secas), y los meses con mayor caudal son de junio a noviembre (lluvias) (Márdero, Schneider, Rogan, Christman, & Lawrence, 2011).

En el mapa de precipitación anual promedio de la PY (figura 4) se puede identificar una clara disminución en la precipitación tanto en la franja costera del estado de Yucatán como en la zona centro-sur de la península, donde convergen los tres estados. En el estado de Campeche, la región comprendida por los municipios de Palizada, Carmen, Candelaria, zona sur de Champotón y zona poniente de Escárcega es donde se presentan los mayores volúmenes de precipitación. En Quintana Roo, las regiones en donde se reportan los mayores volúmenes de precipitación se encuentran en los municipios de Isla Mujeres, Benito Juárez, Lázaro Cárdenas y el norte de la isla de Cozumel, así como la ubicada en la línea costera de los municipios de Othón P. Blanco y Felipe Carrillo Puerto.

En el mapa promedio de temperatura máxima anual histórica de la PY para el periodo 1982-2013 (figura 5) se puede observar que los valores máximos de temperatura rondan los 40 °C, principalmente en el centro del estado de Yucatán y en algunas zonas de Campeche.

En los mapas promedio de temperaturas máximas históricas de la PY (1982-2013) se puede observar que en los periodos mayo-octubre (lluvias) y junio-agosto (canícula), el estado de Yucatán presenta las temperaturas extremas más elevadas, mientras que en los periodos noviembre-abril (secas) y marzo-mayo (fin de la época de secas), las temperaturas más extremas se presentan en Yucatán y Campeche (figura 6). En todos los periodos, Quintana Roo es la entidad donde las temperaturas extremas son menores, aunque algunos municipios aledaños a Campeche y Yucatán también presentan valores de temperatura extrema alta.

Los resultados del análisis de SPI indican que para la PY, en los últimos 30 años, el tipo de sequía que generalmente fue catalogada como la más severa, fue la del tipo D2. Los tipos de sequía D0, D1 y D2 han predominado como sequías extremas en los meses de enero a mayo, mientras que los tipos D2, D3 y D4 se han presentado en los meses de junio a octubre. El análisis espacial del SPI no mostró ningún patrón evidente que sugiriera zonas con mayor probabilidad de sequía (datos no presentados).

Para el caso de la PY, al contar con un abasto casi ilimitado de agua subterránea y de fácil acceso, las épocas secas se mitigan de forma sistemática con la extracción de más agua del acuífero, quedando sólo en riesgo el sector agrícola de temporal y aquellas poblaciones donde la calidad del agua del acuífero o su lejanía a la superficie hacen difícil el acceso al recurso.

Un punto que resalta del impacto de la sequía es que aunque no necesariamente afecte a las zonas más marginadas, sus efectos negativos son mayores en las poblaciones de escasos recursos. Esto pone de manifiesto la necesidad de dirigir y/o mantener los recursos para la prevención y mitigación de los daños a los más marginados (Cenapred 2010, 2012).

Como resultado del análisis de vulnerabilidad ante la sequía realizado en este estudio, se observó que 86 municipios de la PY (49% de la superficie) presentaron un grado de vulnerabilidad media, seguida de 19 municipios con una vulnerabilidad alta (28% de la superficie), siete municipios con vulnerabilidad muy alta (19% de la superficie) y sólo 13 municipios (4% de la superficie) con vulnerabilidad baja (figura 7).

Los municipios que presentan una vulnerabilidad muy alta ante los fenómenos de sequía son los siguientes: Cozumel, en Quintana Roo; Calakmul y Carmen, en Campeche; Panabá, Río Lagartos, Sucilá y Tizimín, en Yucatán. Los

ISSN 2007-2422

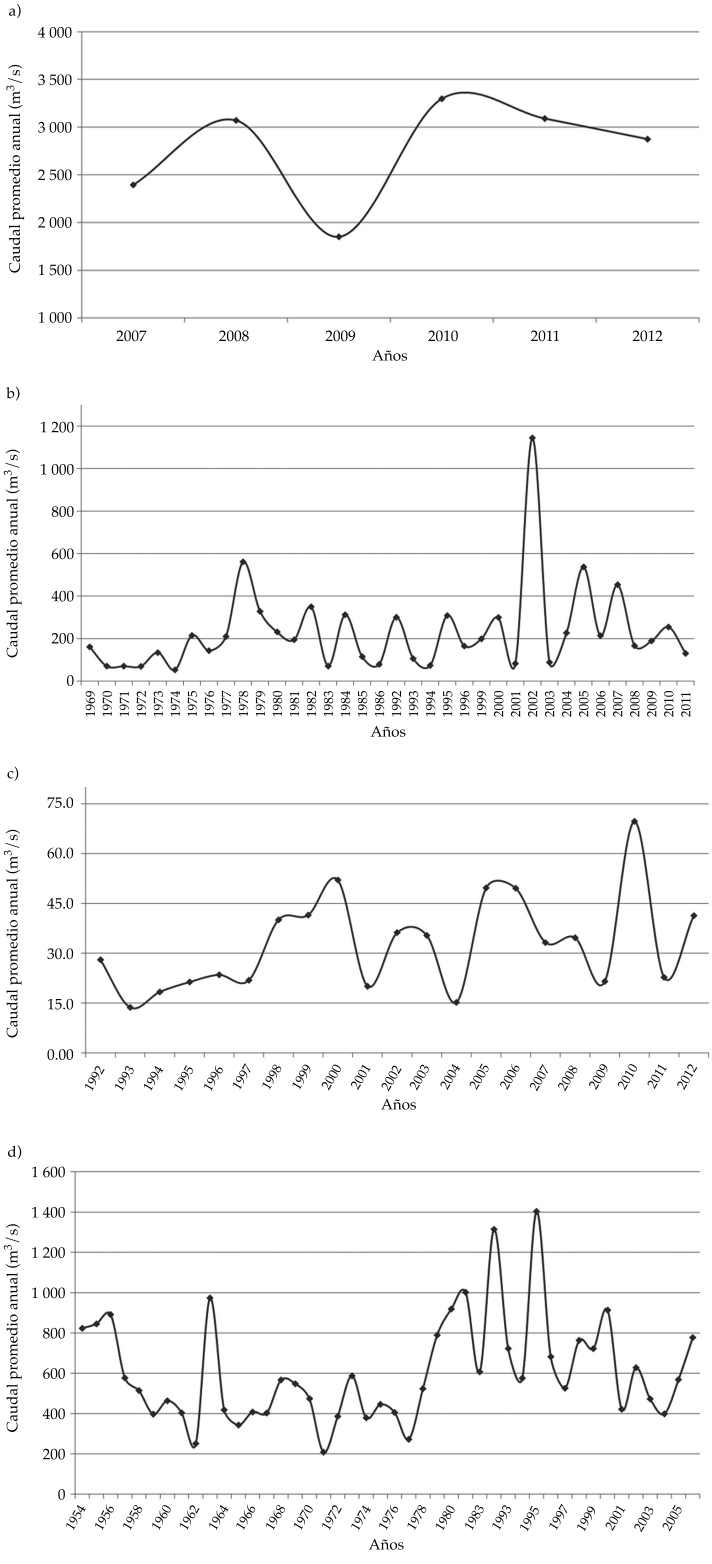


Figura 3. Caudal promedio anual de los principales ríos del estado de Campeche.
Nota: a) río Palizada (años 2007-2012); b) río Champotón (años 1969-2011); c) río Mamantel (años 1992-2013); d) río Candelaria (años 1954-2006). Fuente: PMPMS-CCPY (Conagua, 2014).

• ISSN 2007-2422

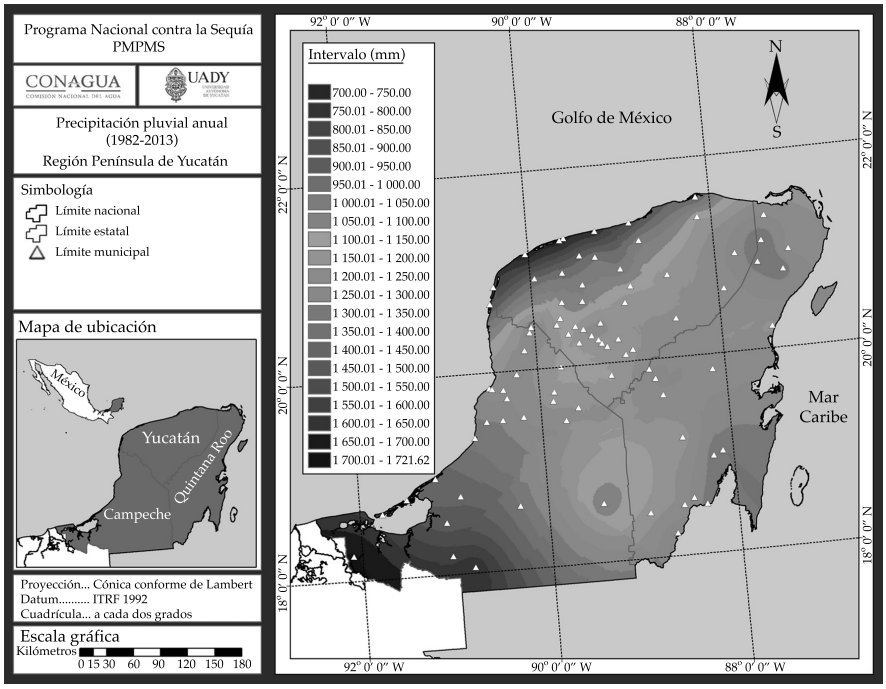


Figura 4. Promedio de la precipitación anual de la península de Yucatán.
Fuente: PMPMS-CCPY (Conagua, 2014). Los triángulos representan las estaciones meteorológicas consideradas para la elaboración de este mapa.

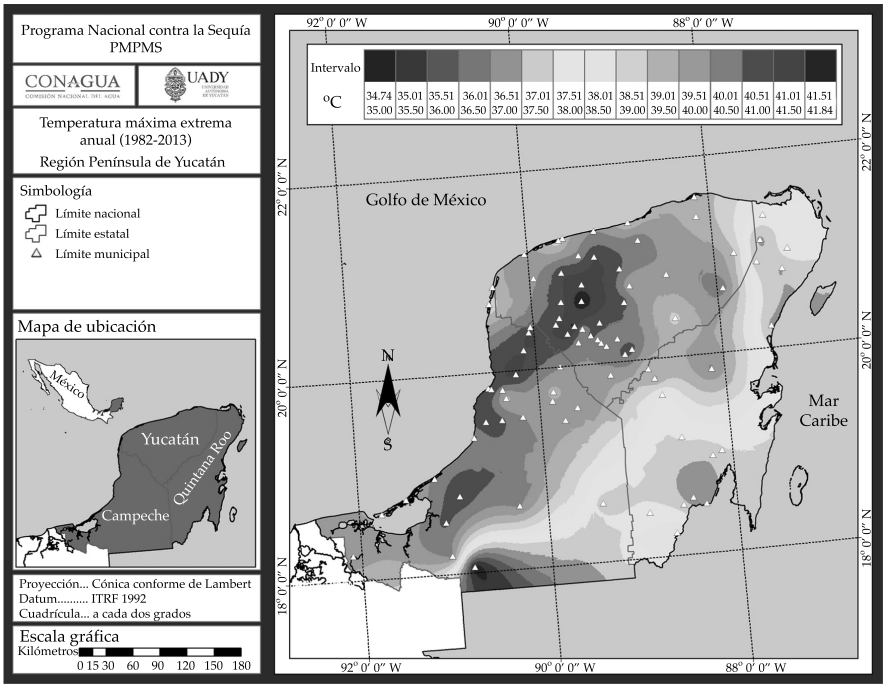


Figura 5. Promedio de temperatura máxima anual histórica de la península de Yucatán (1982-2013).
Fuente: PMPMS-CCPY (Conagua, 2014).

ISSN 2007-2422 •

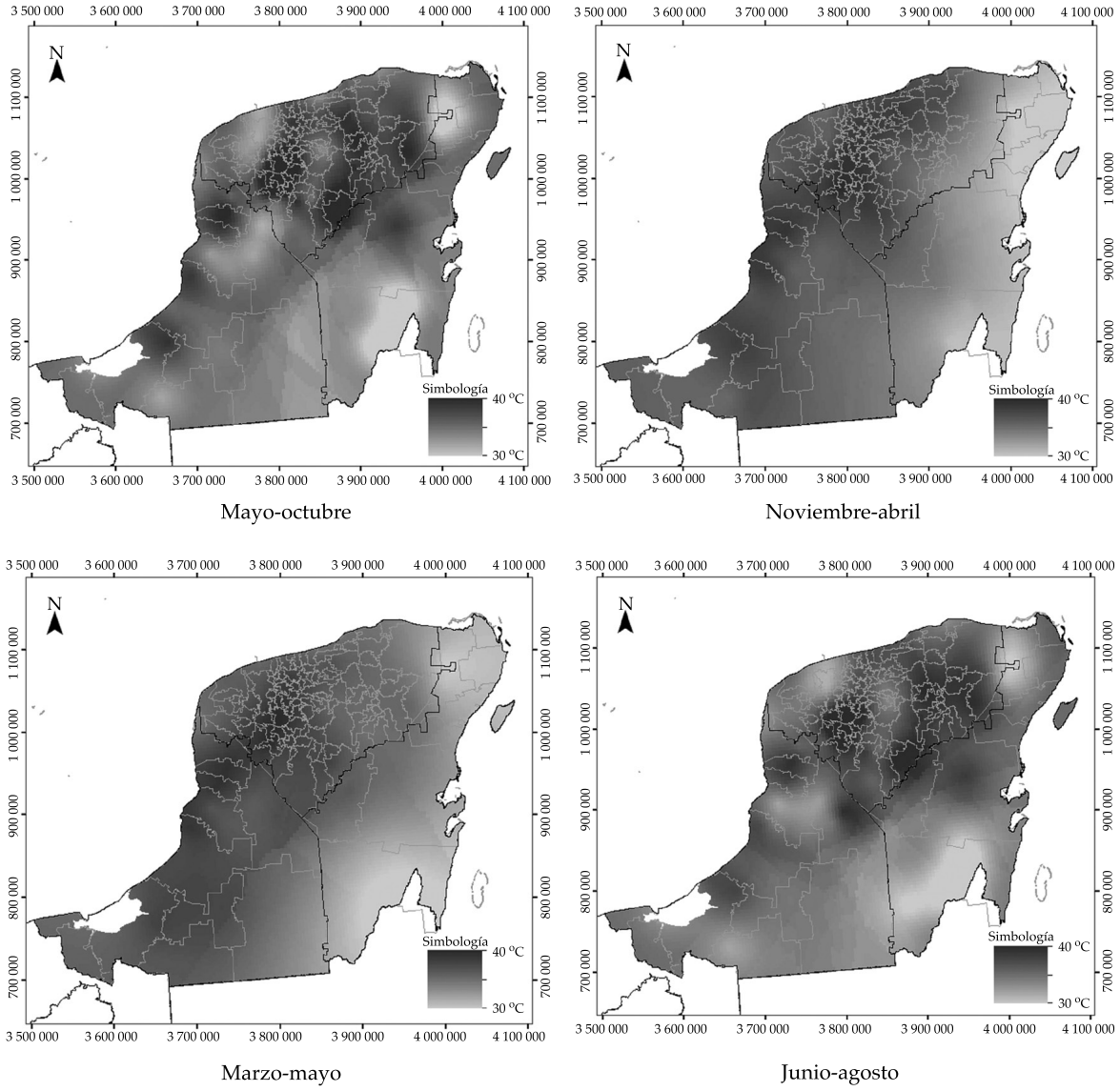


Figura 6. Promedio mensual de temperaturas máximas por periodos; mayo-octubre (lluvias), noviembre-abril (secas), marzo-mayo (fin de la época de secas) y junio-agosto (canícula).
Fuente: PMPMS-CCPY (Conagua, 2014).

municipios que presentan una vulnerabilidad alta ante un fenómeno de sequía en el estado de Campeche son Hecelchacán y Hopelchén; mientras que para el estado de Quintana Roo sobresalen Benito Juárez, Lázaro Cárdenas y Othón P. Blanco; para Yucatán, los municipios de Buctzotz, Celestún, Chemax, Dzilam Bravo, Dzilam Gonzáles, Dzoncahuich, Halachó, Hunucmá, Mérida, Progreso, Sucilá, Tekax, Telchac Pueblo y Tixcacalcupul.

Medidas de prevención y mitigación de la sequía

Se identificaron las medidas preventivas y de mitigación contra la sequía. Las primeras

• ISSN 2007-2422

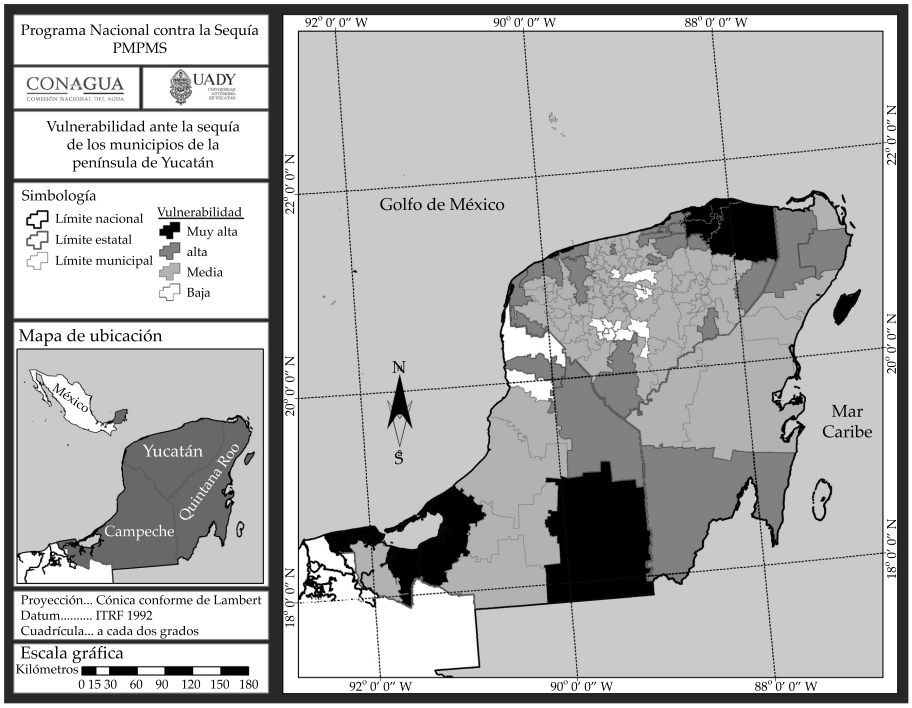


Figura 7. Mapa de vulnerabilidad ante la sequía de la península de Yucatán en el ámbito municipal. Fuente: PMPMS-CCPY (Conagua, 2014).

se realizarán para evitar que se presenten daños en caso de un fenómeno de sequía y las segundas cuando el fenómeno de la sequía ya esté presente, para disminuir sus efectos. Cada medida tiene niveles de aplicación de acuerdo con la etapa de la sequía en la que se encuentre la región. Las medidas preventivas comprenden aquellas relacionadas con capacitación, para que los usuarios hagan un uso más eficiente del recurso agua en la satisfacción de sus necesidades; mientras que las medidas de mitigación son estrategias de respuesta que los usuarios pueden hacer por sí mismos o con apoyo de instituciones.

En el cuadro 3 se presenta un resumen de las principales medidas consideradas para actuar en el largo (medidas preventivas) y corto plazos (medidas de mitigación). La lista completa de medidas identificadas se reportaron por sector de usuarios o sociedad organizada incluidos en el consejo de cuenca de la PY y se puede consultar en el PMPMS de la PY (Conagua, 2014).

Protocolo de alertamiento en caso de sequía

Se desarrolló un protocolo de alertamiento en el que se establecen los momentos de acción para llevar a cabo la declaratoria de inicio, las actividades pertinentes a realizar en cada etapa de sequía, la declaratoria de finalización de la contingencia en caso de sequía, así como el recuento de los daños y acciones para subsanarlos (figura 8). Se incluye a las instituciones que, de acuerdo con sus competencias y funciones, se sugiere que sean las responsables de realizar las actividades sugeridas en cada situación. Finalmente, se integra el protocolo para declarar el fin de la sequía y las acciones sugeridas después del evento, entre las cuales están el recuento de los daños y la identificación de acciones de prevención.

ISSN 2007-2422

Cuadro 3. Principales medidas preventivas y de mitigación de la sequía recomendadas para los diferentes sectores del Consejo de Cuenca.

Medidas preventivas	Medidas de mitigación
Monitoreo y alertamiento de la sequía	Racionamiento y consumo eficiente del agua (reúso de agua entre sectores, captación de agua de lluvia, priorización del uso del agua, riego eficiente y reducido)
Campañas para el uso eficiente del agua y riego (reducción, reutilización, reparación de fugas)	Suministro de agua a sectores afectados
Implemento de uso de ecotecnologías	Modificación del calendario de quemas con base en las condiciones climatológicas
Estudio de riesgo hidrometeorológico	Proporción de apoyos económicos y en especie a sectores afectados
Difusión de medidas de mitigación	Subsidio de tarifas eléctricas para los sectores afectados
Promoción de conservación de suelos	Preparación de los decretos y documentación necesaria para aplicar las medidas en sequía
Incremento de la reforestación	
Promoción del uso de sistemas de captación de agua de lluvia	
Apoyo del desarrollo de programas de conservación de agua local	
Realización y aplicación de programas de medidas preventivas y de mitigación de la sequía (PMPMS) del Consejo de Cuenca y de las principales ciudades de la península de Yucatán	

Fuente: Conagua, 2014.

Conclusiones

La sequía no representa un fenómeno altamente catastrófico para la PY como para otras zonas de la república. La sequía hidrológica no es un problema en la PY, pues las pocas fuentes superficiales de agua dulce no son la base para el abastecimiento de las poblaciones. Sin embargo, la sequía agrícola, incluso para productores que cuentan con sistemas de riego, produce pérdidas y bajo rendimiento de cultivos, cabezas de ganado y colmenas, disminución de la calidad de los productos, así como incremento en los costos de producción (p. ej., resiembra para productores de temporal o mayor consumo de energía para productores con sistema de riego), lo que se traduce en la reducción del ingreso de los productores. A nivel de los organismos operadores no se registra disminución en la disponibilidad de agua durante la época de sequía y sólo se reporta su mengua para consumo humano en algunas localidades, la mayoría con pocos habitantes, en donde el acuífero se encuentra muy profundo o la calidad natural del agua no es adecuada para consumo humano. Sin embargo, al depender la PY casi en su totalidad del acuífero para el abasto del agua, su disponibilidad podría disminuir súbitamente por problemas en la infraestructura del sistema operador (sequía operativa) o la contaminación del acuífero. Un ejemplo de sequía operativa podría ser en el caso de la destrucción de infraestructura hidráulica o de suministro de energía eléctrica a consecuencia de un huracán. La contaminación del acuífero es un problema que puede agravarse con rapidez debido a la alta permeabilidad del sustrato geológico, y a que no existen sistemas de drenaje, colecta, tratamiento y potabilización de agua suficientes en la PY. Se sugiere la

• ISSN 2007-2422

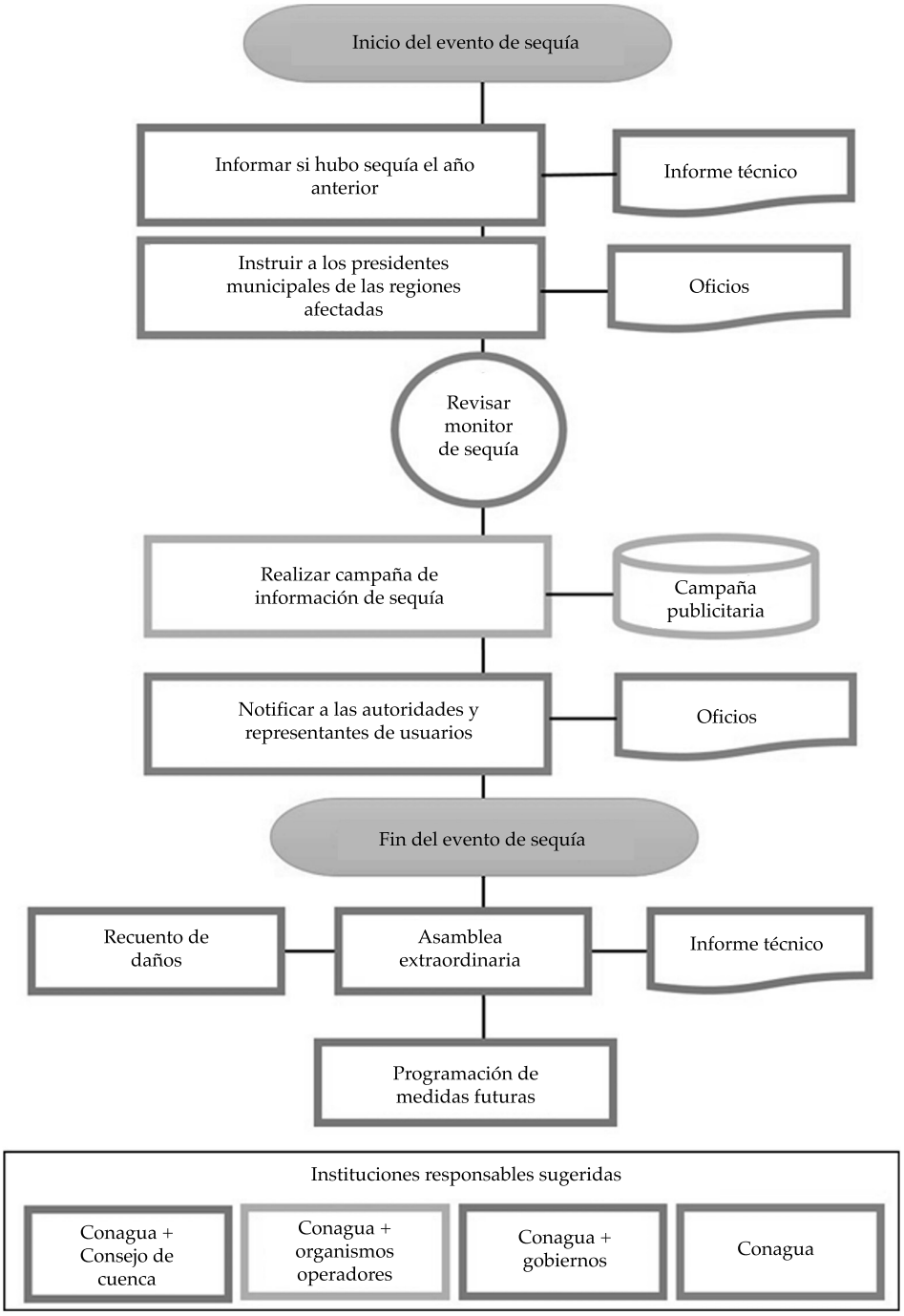


Figura 8. Diagrama de flujo del protocolo sugerido de alertamiento en caso de sequía.

difusión e implementación pronta del PMPMS del Consejo de Cuenca para que todos los actores involucrados conozcan las acciones que deben realizarse y asuman su responsabilidad en el manejo de una contingencia por sequía en la península de Yucatán.

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 151-165
ISSN 2007-2422 •

Referencias

Bautista-Zúñiga, F., Palma, D., & Huchin, W. (2005). Actualización de la clasificación de los suelos del estado de Yucatán. En: *Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales*. Bautista, F., & Palacio, G. (ed.). Campeche, México: Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología.

Beddows, P., Blanchon, P., Escobar, E., & Torres-Talamante, O. (2007). Los cenotes de la Península de Yucatán. *Arqueología Mexicana*, *14*(5), 32-35.

Cenapred (2009). *Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2008*. México, DF: Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Cenapred (2010). *Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2009*. México, DF: Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Cenapred (2012). *Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2010*. México, DF: Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Conagua (2007-2012). *Programa hídrico por organismo de cuenca, visión 2030. Gerencia regional Península de Yucatán XII*. México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos naturales, Comisión Nacional del Agua.

Conagua (2013). *Estadísticas del agua en México*. México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos naturales, Comisión Nacional del Agua.

Conagua (2014). *Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía del Consejo de Cuenca Península de Yucatán (PMPMS-CCPY)*. México, DF: Comisión Nacional del Agua, Universidad Autónoma de Yucatán (UADY).

Contreras, C. S. (2005). Las sequías en México durante el siglo XIX. *Investigaciones Geográficas*, *56*, 118-133.

DOF (2004a). Declaratoria de Contingencia Climatológica para Efectos de las Reglas de Operación del Fondo para Atender a la Población Rural Afectada por Contingencias Climatológicas (FAPRACC). Sagarpa Campeche. Folio 37. *Diario Oficial de la Federación*.

DOF (2004b). Declaratoria de Contingencia Climatológica para Efectos de las Reglas de Operación del Fondo para Atender a la Población Rural Afectada por Contingencias Climatológicas (FAPRACC). Sagarpa Quintana Roo. Folio 3060. *Diario Oficial de la Federación*.

DOF (2004c). Declaratoria de Contingencia Climatológica para Efectos de las Reglas de Operación del Fondo para Atender a la Población Rural Afectada por Contingencias Climatológicas (FAPRACC). Sagarpa Quintana Roo. Folio 65. *Diario Oficial de la Federación*.

DOF (2007). Declaratoria de Contingencia Climatológica para Efectos de las Reglas de Operación del Fondo para Atender a la Población Rural Afectada por Contingencias Climatológicas (FAPRACC). Sagarpa Campeche. Folio 595. *Diario Oficial de la Federación*.

DOF (2008). Declaratoria de Contingencia Climatológica para Efectos de las Reglas de Operación del Fondo para Atender a la Población Rural Afectada por Contingencias Climatológicas (FAPRACC). Gobierno del Estado de Yucatán. Folio 300146. *Diario Oficial de la Federación*.

DOF (2009a). Declaratoria de Contingencia Climatológica para Efectos de las Reglas de Operación del Fondo para Atender a la Población Rural Afectada por Contingencias Climatológicas (FAPRACC). Gobierno del Estado de Yucatán. Folio 300298. *Diario Oficial de la Federación*.

DOF (2009b). Declaratoria de Contingencia Climatológica para Efectos de las Reglas de Operación del Fondo para Atender a la Población Rural Afectada por Contingencias Climatológicas (FAPRACC). Gobierno del Estado de Yucatán. Folio 300319. *Diario Oficial de la Federación*.

DOF (2013). Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. México. *Diario Oficial de la Federación*.

Duno-de Stefano, R., Can-Itza, L., Rivera-Ruiz, A., & Calvo-Irabién, L. (2012). Regionalización y relaciones biogeográficas de la Península de Yucatán con base en los patrones de distribución de la familia Leguminosae. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *83*, 1053-1072.

Escobar, A. (1997). Las sequías y sus impactos en la sociedad del México decimonónico, 1856-1900 (32 pp.) En: *Historia y Desastres en América Latina*. Volumen II. García, A. V. (Coord.). Panamá: Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.

FAO (2009). *Perfil para el cambio climático*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación. Recuperado de ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/012/i1323s/i1323s00.pdf.

Flores, J. S., & Espejel, I. (1994). *Tipos de vegetación de la Península de Yucatán. Etnoflora Yucatanense* (135 pp.). Fascículo 3. Mérida, México. Universidad Autónoma de Yucatán.

García-Prats, A. (2006). *Sequías: teoría y prácticas*. Valencia, España: Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia.

Giddings, L., Soto, M., Rutherford, B. M., & Maarouf, A. (2005). Standardized Precipitation Index Zones for México. *Atmósfera*, *18*, 33-56.

INEGI (2010). *Censo de población y vivienda 2010: Campeche*. México, DF: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Recuperado de www.inegi.gob.mx.

• ISSN 2007-2422

INEGI (2011). *Anuario estadístico de Quintana Roo*. México, DF: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Recuperado de www.inegi.gob.mx.

INEGI (2012). *Anuario estadístico de Campeche*. México, DF: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Recuperado de www.inegi.gob.mx.

Lugo-Hubp, J., Aceves-Quesada, R., & Espinasa-Pereña, R. (1992). Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. Universidad Nacional Autónoma de México, *Revista del Instituto de Geografía*, *10*(2), 143-150.

Márdero, S., Schneider, L., Rogan, J., Christman, Z., Lawrence, D. (2012). Sequías en el sur de la Península de Yucatán: análisis de la variabilidad anual y estacional de la precipitación. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, *78*, 19-33.

Mckee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). *The Relationship of Drought Frequency and Duration of Time Scales* (pp. 179-186). Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Jan. 17-23, 1993, Anaheim CA.

Me-Bara, Y., & Valdéz, F. (2003). Droughts as Random Events in the Maya Lowlands. *Journal of Archaeological Science*, *30*(12), 1599-1606.

Mendoza, B., García-Acosta, G., Velasco, V., Jáuregui, E., & Díaz-Sandoval, R. (2007). Frequency and Duration of Historical Droughts from the 16th to the 19th Centuries in the Mexican Maya Lands, Yucatán Peninsula. *Climatic Change*, *83*, 151-168.

Sagarpa (2010). *Programa de Atención a Contingencias Climatológicas (PAAC). Evaluación Externa de Resultados. Universidad Autónoma de Chapingo*. México DF: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

Schmitter-Soto, J., Comín, F., Escobar-Briones, E., Herrera-Silveira, J., Alcocer, J., Suárez-Morales, E., Elías-Gutiérrez, M., Díaz-Arce, V., Marín, L., & Steinich, B. (2002). Hydrogeochemical and Biological Characteristics of Cenotes in the Yucatán Peninsula (SE Mexico). *Hydrobiologia*, *467*, 215-228.

Vidal-Zepeda, R. (2005). Región XI. Península de Yucatán (pp. 189-204). En: *Las regiones climáticas de México*. Vidal-Zepeda, R. México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.

Dirección institucional de los autores

Héctor Estrada Medina

Universidad Autónoma de Yucatán (UADY)
Departamento de Manejo y Conservación de Recursos Naturales Tropicales (Protropico)
Campus de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CCBA)
Km 15.5 Carretera Mérida-Xmatkuil
97315 Mérida, Yucatán, México
hector.estrada@correo.uady.mx

Víctor Cobos Gasca

Universidad Autónoma de Yucatán (UADY)
Departamento de Ecología Tropical
Campus de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CCBA)
Km 15.5 Carretera Mérida-Xmatkuil
97315 Mérida, Yucatán, México

José Luis Acosta Rodríguez
Sergio Peña Fierro

Comisión Nacional del Agua
Organismo de Cuenca Península de Yucatán
Calle 59B núm. 238 x Av. Zamná, Fraccionamiento Yucalpetén
97880 Mérida, Yucatán, México

Mariela Castilla Martínez
Claudia Castillo Carrillo
Santiago Franco Brito
Diana López Castillo
Mariana López Díaz
Wendy Luna Flores
Andrés Maldonado Repetto
Oscar Álvarez Rivera
José Luis Cámara Romero
Andrés Morales Guadarrama
Ana María Moreno Arjona
Biiniza Pérez Niño
Pamela Rodríguez Lara
Rosa Linda Zapata Luna

Universidad Autónoma de Yucatán (UADY)
Campus de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CCBA)
Km 15.5 Carretera Mérida-Xmatkuil
97315 Mérida, Yucatán, México

Haga clic aquí para escribir al autor

ISSN 2007-2422

Sequía en Charquillos, Zacatecas, México, 2010.

Foto: José Luis Martínez Ruiz.

Análisis tripartita de escurrimientos naturales: aplicación a la caracterización de sequías en el río Colorado

• Álvaro A. Aldama* •
Consultor independiente
*Autor para correspondencia

Resumen

Aldama, A. A. (septiembre-octubre, 2016). Análisis tripartita de escurrimientos naturales: aplicación a la caracterización de sequías en el río Colorado. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *7*(5), 167-195.

En este trabajo se presenta el análisis del régimen de escurrimiento natural en la cuenca del río Colorado, a la luz de lo establecido por el Tratado de 1944 entre México y Estados Unidos. Primeramente, se construye el registro mensual de escurrimiento natural anual en la estación más cercana a la frontera entre ambos países, que corresponde al sitio aguas arriba de la presa Imperial. Esto permitió contar con valores de septiembre de 1906 a diciembre de 2012, de acuerdo con la información más reciente disponible. Se calculan los estadísticos más significativos de dicho registro y se comprueba que no sigue una distribución normal. Se procede a calcular los percentiles 2.28, 15.87, 84.13 y 97.72, y con base en ellos se caracteriza el registro histórico en periodos extraordinariamente escasos, escasos, normales, abundantes y extraordinariamente abundantes. Mediante la aplicación de un análisis de Fourier, se determinan los periodos dominantes del registro. A través de una novedosa descomposición tripartita, se calculan los componentes tendenciales, cíclicos dominantes y aleatorios del registro. Se demuestra que estos últimos siguen una distribución normal y se lleva a cabo la caracterización del registro histórico en periodos muy secos, secos, normales, húmedos y muy húmedos, de acuerdo con el índice dinámico estandarizado de escurrimiento propuesto en este trabajo por el autor.

Palabras clave: escurrimiento natural anual en la cuenca del río Colorado, Tratado de 1944 entre México y Estados Unidos, aguas transfronterizas, distribución normal, Teorema del Límite Central, percentiles, análisis espectral, descomposición tripartita, componente tendencial, componente cíclico, componente aleatorio, índice dinámico estandarizado de escurrimiento.

Abstract

Aldama, A. A. (September-October, 2016). Three-Part Decomposition of Natural Flows: Application to the Colorado River Drought Characterization. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 7(5), 167-195.*

An analysis of the natural flow in the Colorado River basin is presented in this paper, within the context of what is established by the 1944 Treaty between Mexico and the United States. Firstly, the monthly record of natural annual flow at the station closest to the border between both countries, which corresponds to the location just upstream of the Imperial dam, is built. Thus, values between September of 1906 and December of 2012 were included, in accordance with the most recently available information. The most important statistics of such record are estimated and it is shown that the record itself does not follow a normal distribution. The 2.28, 15.87, 84.13 y 97.72 sample percentiles are computed and on the basis of their values, the historical record is characterized in terms of extremely scarce, scarce, normal, abundant and extremely abundant periods. The dominant periods in the record are identified via Fourier analysis. Through a novel three-part decomposition, the trend, dominant cyclical and random components of the record are identified. It is shown that the last follows a normal distribution and a characterization of the historical record in very dry, dry, normal, humid and very humid periods is performed, on the basis of a dynamic standardized runoff index, proposed by the author herein.

***Keywords**: Natural annual flow in the Colorado River basin, 1944 Treaty between México and the United States, transboundary waters, normal distribution, Central Limit Theorem, percentiles, spectral analysis, three-part decomposition, trend, cyclical component, random component, dynamic standardized runoff index.*

Recibido: 31/08/2015
Aceptado: 26/04/2016

Introducción

Los retos que plantea la gestión sustentable del agua en las cuencas transfronterizas entre México y Estados Unidos son extraordinarios, habida cuenta de que el recurso es escaso en la región y existe una gran competencia por el mismo. Además, la legislación que regula el aprovechamiento del líquido en cada país y el Tratado sobre Distribución de las Aguas Internacionales celebrado entre México y los Estados Unidos en 1944 definen un marco jurídico complejo que es necesario respetar al tomar cualquier decisión relativa al manejo del agua. La realidad es que el sistema de cuencas transfronterizas, en particular las de los ríos Colorado y Bravo, exhibe un frágil equilibrio que se trastoca cada vez que ocurre una sequía. El Tratado de 1944 menciona ciertas medidas especiales de gestión que deben tomarse cuando ocurra una "extraordinaria sequía", pero desafortunadamente no define el término con precisión. Las asignaciones que el Tratado hace de las aguas compartidas por las dos naciones en las cuencas del Colorado y del Bravo son condicionantes para el aprovechamiento del recurso en ambos países. La interpretación y aplicación de las disposiciones contenidas en el Tratado en relación con sequías extraordinarias ha sido instrumentada por la Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA), de conformidad con las atribuciones que le confiere el propio Tratado. No obstante, la reciente ocurrencia de periodos muy secos tanto en la cuenca del río Colorado como en la del río Bravo ha hecho que surjan presiones al interior de México y de Estados Unidos en el sentido que resulta necesario definir un criterio que permita determinar cuándo ocurre una extraordinaria sequía y entonces aplicar las disposiciones especiales que al respecto prevé el Tratado. Las secciones mexicana y estadounidense de la CILA, con el apoyo de las instancias involucradas en la gestión del agua en ambos países, entre las que destacan la Comisión Nacional del Agua (Conagua) y el *United States Bureau of Reclamation* (USBR), han iniciado estudios para caracterizar el régimen de escurrimiento en el río Colorado y contar con criterios que permitan, sin ambigüedades, determinar cuándo es necesario aplicar restricciones al consumo del agua en ambos países, a fin de que se cumplan las disposiciones generales del Tratado. Un avance en este sentido lo constituyó el Acta 319 (CILA, 2012), firmada el 20 de noviembre de 2012, en Coronado, California. A través de dicho instrumento jurídico, las secciones de la CILA acordaron una serie de medidas que incluyen aspectos como la generación y conservación de volúmenes adicionales de agua; control de salinidad; manejo de variabilidad en el abastecimiento de agua en la cuenca; oportunidad para establecer "agua mexicana creada intencionalmente"; intercambio de agua, y entrega de agua para el ambiente, entre otras. Dicha Acta debe ser reemplazada por un Acta Integral a partir del 1° de enero de 2018, lo cual subraya la importancia y urgencia de contar con los criterios antes referidos para caracterizar el régimen de escurrimiento en el río, en particular los periodos secos. El propósito de este artículo es contribuir al acervo metodológico disponible hasta la fecha para llevar a cabo dicha caracterización. Para ello, primero es conveniente revisar lo dispuesto por el Tratado de 1944.

Disposiciones relevantes del Tratado de 1944

El artículo 10 del Tratado sobre Distribución de Aguas Internacionales entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América establece lo siguiente:

> "De las aguas del río Colorado, cualquiera que sea su fuente, se asignan a México:
>
> a).- Un volumen garantizado de 1,850,234,000 metros cúbicos (1,500,000 acres pies) cada año, que se entregará de acuerdo con lo dispuesto en el artículo 15 de este Tratado.
>
> b).- Cualesquier otros volúmenes que lleguen a los puntos mexicanos de derivación; en la inteligencia de que, cuando a juicio de la Sección de los Estados Unidos, en cualquier

• ISSN 2007-2422

año exista en el río Colorado agua en exceso de la necesaria para abastecer los consumos en los Estados Unidos y el volumen garantizado anualmente a México de 1,850,234,000 metros cúbicos (1,500,000 acres pies), los Estados Unidos se obligan a entregar a México, según lo establecido en el artículo 15 de este Tratado, cantidades adicionales de agua del sistema del río Colorado hasta por un volumen total que no exceda de 2,096.931,000 metros cúbicos (1,700,000 acres pies) anuales. México no adquirirá ningún derecho, fuera del que le confiere este inciso, por el uso de las aguas del sistema del río Colorado para cualquier fin, en exceso de 1,850,234,000 metros cúbicos (1,500,000 acres pies) anuales.

En los casos de extraordinaria sequía o de serio accidente al sistema de irrigación de los Estados Unidos, que haga difícil a éstos entregar la cantidad garantizada de 1,850,234,000 metros cúbicos (1,500,000 acres pies), por año, el agua asignada a México, según inciso a) de este artículo, se reducirá en la misma proporción en que se reduzcan los consumos en los Estados Unidos".

Debe observarse que en el caso de la cuenca del río Colorado, el Tratado asigna volúmenes de escurrimiento anuales. Por tanto, a fin de eliminar el efecto que pueda tener la operación de la infraestructura hidráulica construida en Estados Unidos, los análisis encaminados a la definición del término "extraordinaria sequía" deben abordarse en términos de los escurrimientos naturales anuales para el río Colorado.

El registro mensual de escurrimientos naturales anuales en la cuenca del río Colorado

En vista de lo dispuesto por el artículo 10 del Tratado, las siguientes secciones estarán enfocadas en analizar el comportamiento estadístico de los escurrimientos naturales *anuales* en la cuenca del río Colorado hasta el punto de entrega del agua a México por parte de Estados Unidos. La Conagua proporcionó al autor el registro de escurrimientos naturales mensuales restituidos en dicha cuenca, que contiene información de octubre de 1905 a diciembre de 2012. Dicho registro ha sido integrado por el USBR y es el más reciente disponible.

Sea $v_{m,a}$ el volumen de escurrimiento natural correspondiente al mes m (con $m = 1$ representando a enero; $m = 2$, febrero; …, $m = 12$, diciembre) y al año calendario a, que puede tomar valores desde 1905 hasta 2012. Entonces, el registro de escurrimientos naturales mensuales $R_v \equiv \{[v_{m,a}]_{a=1905}\}_{m=10}^{12} \cup \{[v_{m,a}]_{a=1906}^{2012}\}$ permite construir un *registro mensual de escurrimientos naturales anuales*. Lo anterior, con el propósito de capturar el comportamiento detallado de la dinámica de escalas de tiempo subanuales en los escurrimientos anuales. Para el efecto, defínase el siguiente índice anual consecutivo:

$$k = a - 1905,\ a = 1905, 1906, \ldots, 2012 \qquad (1)$$

Constrúyase el registro $R_u \equiv \{u_\ell\}_{\ell=1}^{1287}$ con elementos definidos como sigue:

$$u^{(C)}_{12k+m-9} \equiv u^{(C)}_{12(a-1905)+m-9} = v^{(C)}_{m,a},\ a = 1905, 1906, \ldots, 2008$$

$$\text{donde } m = \begin{cases} 10, 11, 12 \text{ si } a = 1905 \\ 1, 2, \ldots, 12 \text{ si } a = 1906, \ldots, 2012 \end{cases} \qquad (2)$$

Entonces, defínase el volumen de escurrimiento natural anual correspondiente al índice consecutivo j como:

$$U_{j-12} = \sum_{\ell=j-11}^{j} u_\ell,\ j = 12, 13, \ldots, 1287 \qquad (3)$$

El volumen de escurrimiento correspondiente al mes m y al año calendario a se obtiene como sigue:

$$V_{m,a} = U_{12(a-1906)+m-9},\ a = 1906, 1907, \ldots, 2008$$

$$\text{donde } m = \begin{cases} 9, 10, \ldots, 12 \text{ si } a = 1906 \\ 1, 2, \ldots, 12 \text{ si } a = 1907, \ldots, 2012 \end{cases} \qquad (4)$$

De este modo, se generó el registro mensual de escurrimientos naturales anuales

ISSN 2007-2422

$R_V \equiv \{[V_{m,a}]_{a=1906}\}_{m=9}^{12} \cup \{[V_{m,a}]_{a=1907}^{2010}\}_{m=1}^{12}$. Nótese que el registro anterior comienza con el escurrimiento natural anual del mes de septiembre de 1906, pues los volúmenes correspondientes a los meses anteriores de ese año no pueden ser calculados, al no contarse con información necesaria. Por tanto, el número total de elementos del registro R_V es igual a 12(2012 - 1906) + 4 = 1 276 ≡ N. En la figura 1 se muestra la evolución temporal del registro mensual de escurrimientos naturales anuales en la cuenca del río Colorado.

Distribución empírica de probabilidad y estadísticos principales

Con el objeto de determinar la distribución empírica de frecuencias relativas acumuladas del registro mensual de escurrimientos naturales anuales numerados consecutivamente, $R_U \equiv \{U_p\}_{p=0}^{N-1}$, es necesario reordenar los elementos de dicho registro. Al respecto, sean $\{U_{(n)}\}_{n=0}^{N-1}$ los estadísticos de orden de R_U. En otras palabras, $\{U_{(n)}\}_{n=0}^{N-1}$ constituye el conjunto de valores de los escurrimientos naturales anuales, ordenados de menor a mayor. Supóngase ahora que el k-ésimo valor del conjunto $\{U_{(n)}\}_{n=0}^{N-1}$ corresponde con el ℓ-ésimo valor de R_U. Entonces, se dice que el número de orden o rango de U_ℓ es $k + 1$. Indíquese lo anterior como sigue:

$$r(U_\ell) = k+1, \quad \text{si} \quad U_\ell = U_{(k)};$$
$$\ell = 0, 1, \ldots, N-1; \; k = 0, 1, \ldots, N-1 \qquad (5)$$

donde $r(\cdot)$ denota el rango.

Recuérdese ahora que la distribución de probabilidad acumulada $F(\cdot)$ de un cierto valor X se define como la probabilidad de que X no sea excedido por una variable aleatoria muda x, esto es:

$$F(U) \equiv P(x \leq X) \qquad (6)$$

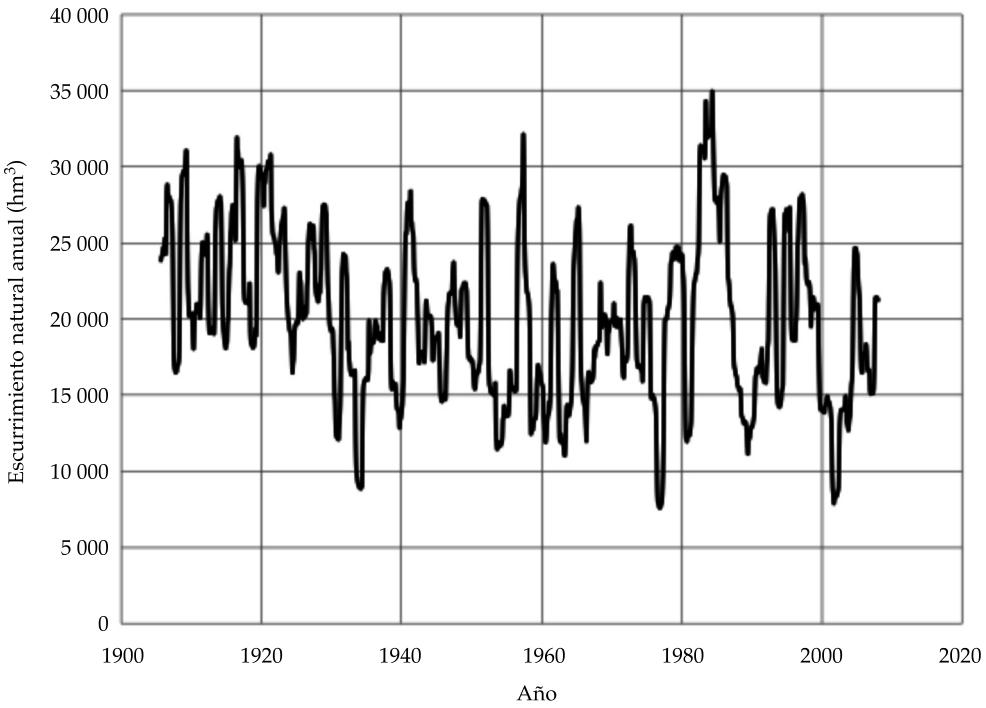


Figura 1. Evolución mensual de los escurrimientos naturales anuales.

• ISSN 2007-2422

En congruencia con la ecuación (6), la probabilidad empírica p_{k+1} de que un cierto valor del escurrimiento anual U_ℓ no sea excedido estará dada por:

$$p_{k+1} = \frac{k+1}{N+1} \equiv \frac{r(U_\ell)}{N+1} \qquad (7)$$

Con base en la ecuación (7) se obtuvo la distribución empírica de probabilidad mostrada en la figura 2.

Es relevante subrayar que en vista de que los escurrimientos naturales anuales representan la suma de escurrimientos mensuales y éstos representan la suma de escurrimientos diarios, el teorema del límite central (Meyer, 1973), cuya demostración se incluye en Aldama (2011), haría pensar que la distribución de aquéllos debería aproximarse asintóticamente a una normal.

Los parámetros estadísticos más importantes del registro mensual de escurrimientos naturales anuales están incorporados en el cuadro 1. Como puede observarse, la mediana es 1.64% inferior a la media. Asimismo, el valor del coeficiente de variación indica que la variabilidad de los escurrimientos naturales anuales es moderada. Por otra parte, la densidad de probabilidad empírica exhibe ligera asimetría positiva (con el máximo desplazado hacia la derecha, a diferencia de la densidad de probabilidad normal, que es simétrica) y es ligeramente platicúrtica (menos puntiaguda que la normal). Todo lo anterior puede obedecer a efectos asociados con el tamaño de la muestra, por lo que no necesariamente desecha la posibilidad de que la distribución poblacional sea normal, de donde es pertinente evaluar la hipótesis de normalidad.

Prueba de normalidad

La distribución normal teórica puede ser estimada como:

$$F_{\mathcal{N}}(U;\overline{U},S_U) \equiv \frac{1}{\sqrt{2\pi}S_U}\int_{-\infty}^{U}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u-\overline{U}}{S_U}\right)^2\right]du \qquad (8)$$

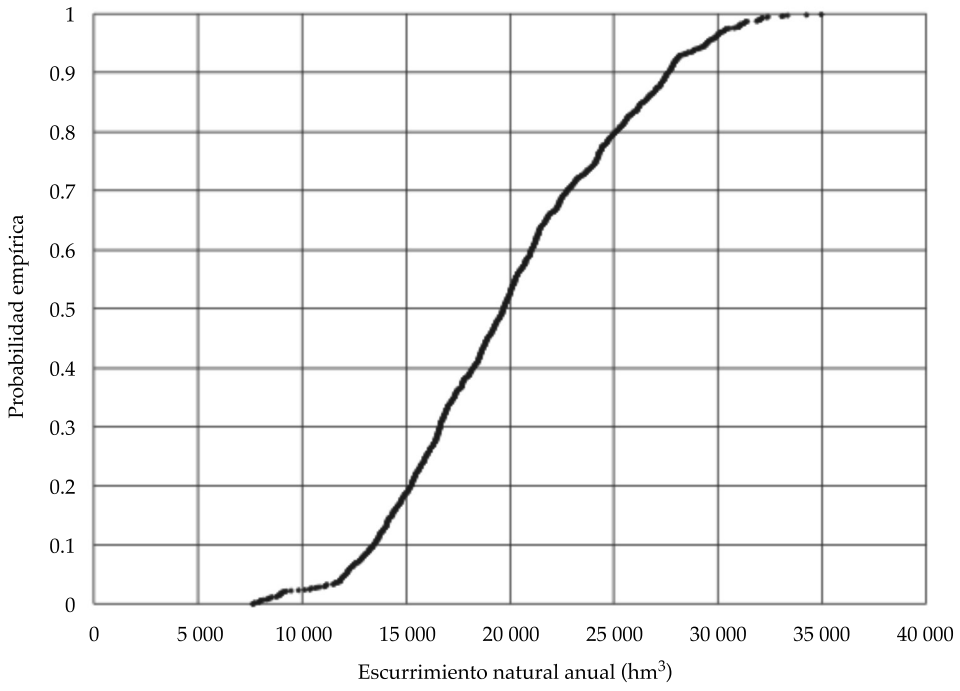


Figura 2. Distribución de probabilidad empírica acumulada del registro mensual de los escurrimientos naturales anuales.

ISSN 2007-2422

Cuadro 1. Parámetros más importantes de la distribución de probabilidad empírica del registro mensual de escurrimientos naturales anuales.

Parámetro	Valor
Media	19 971.19 hm^3
Desviación estándar	5 389.66 hm^3
Mediana	19 643.94 hm^3
Coeficiente de variación	0.270
Coeficiente de asimetría	0.192
Curtosis	-0.559

donde $\overline{U}$ y S_u representan estimadores de la media y la desviación estándar poblacionales del registro mensual de los escurrimientos naturales anuales del río Colorado. Para el cálculo de dichos parámetros se han empleado los métodos de momentos, mínimos cuadrados y máxima verosimilitud.

En las figuras 3 a 5 se muestran comparaciones entre las distribuciones empírica y normal teórica, estimada por los métodos de momentos, mínimos cuadrados y máxima verosimilitud, respectivamente. Como puede observarse, los datos siguen de manera notable la tendencia de la distribución normal. Con el objeto de realizar una evaluación cuantitativa, se juzga conveniente aplicar una prueba de normalidad. Entre las pruebas de normalidad disponibles, la de Kolmogorov-Smirnov (NIST/Sematech, 2006) es la menos sensible al tamaño de la muestra, por lo que se ha elegido para los efectos de este trabajo.

La hipótesis nula para la aplicación de dicha prueba será que la distribución poblacional es normal. A partir de los datos de la muestra se construye el estadístico siguiente:

$$D = \sup_U \left| F_e(U;N) - F_{\mathcal{N}}(U;\overline{U},S_U) \right| \qquad (9)$$

donde $F_e(U;N)$ representa la extensión continua de la distribución de probabilidad empírica acumulada, definida como:

$$F_e(U;N) \equiv \frac{1}{N+1}\sum_{n=1}^{N} I_{U_{(n)}\le U} \qquad (10)$$

donde $I_{U_{(n)}\le U}$ es la función indicadora, que toma el valor de 1 si $U_{(n)} \le U$ y 0 si $U_{(n)} > U$. Obsérvese que $F_e(U;N)$ está relacionada con la probabilidad empírica mediante la siguiente expresión:

$$F_e[U_{(k)};N_C] = p_k\,;\; k = 1, 2, \ldots, N_C \qquad (11)$$

Se procedió a calcular el parámetro D y se obtuvo el siguiente resultado: $D = 0.0464$, con parámetros estimados mediante el método de momentos $D = 0.0445$, con parámetros estimados mediante el método de mínimos cuadrados, y $D = 0.0465$, con parámetros estimados mediante el método de máxima verosimilitud. El valor crítico para este parámetro, correspondiente a un nivel de significancia de 5%, es $D_{cr} = 1.36/\sqrt{N_C} = 0.0381$ (West Chester University, 2009). Dado que en los tres casos, $D > D_{cr}$, se descarta la hipótesis nula. En conclusión, los datos analizados no siguen una distribución normal. Este resultado llama poderosamente la atención, en vista de la expectativa creada por la aplicación del teorema del límite central, mismo que predice que datos como los analizados se deberían distribuir en forma asintóticamente normal. Sobre este particular se abundará después.

Caracterización del régimen mensual de escurrimiento natural anual por medio de percentiles

Sea x una variable aleatoria normalmente distribuida, con media μ y desviación estándar σ, de modo que su distribución de probabilidad

• ISSN 2007-2422

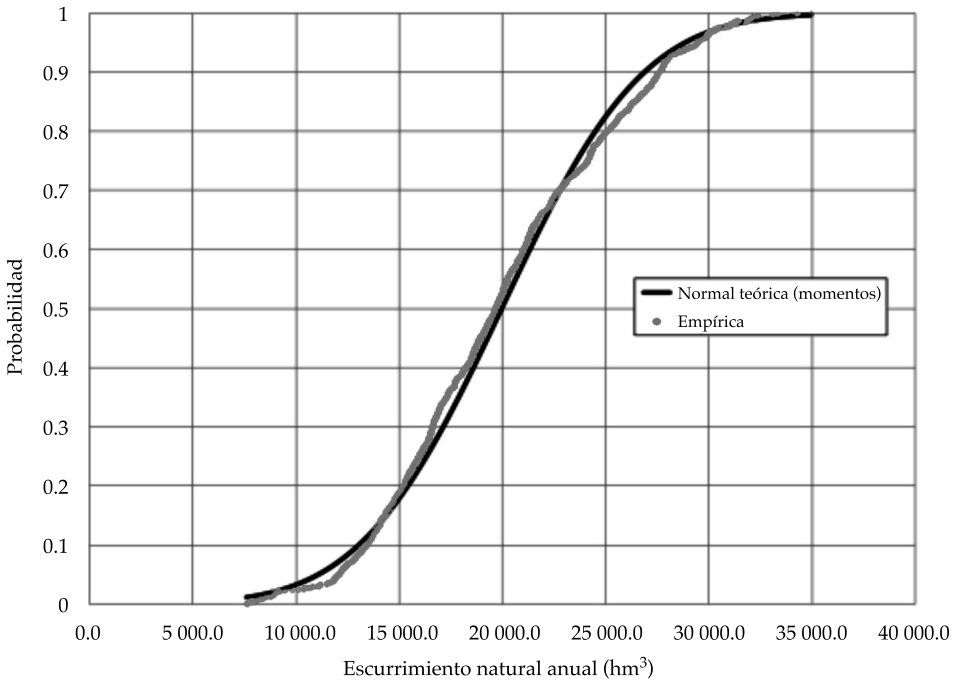


Figura 3. Comparación entre las distribuciones empírica y normal teórica, estimada por el método de momentos, del registro mensual de escurrimientos naturales anuales.

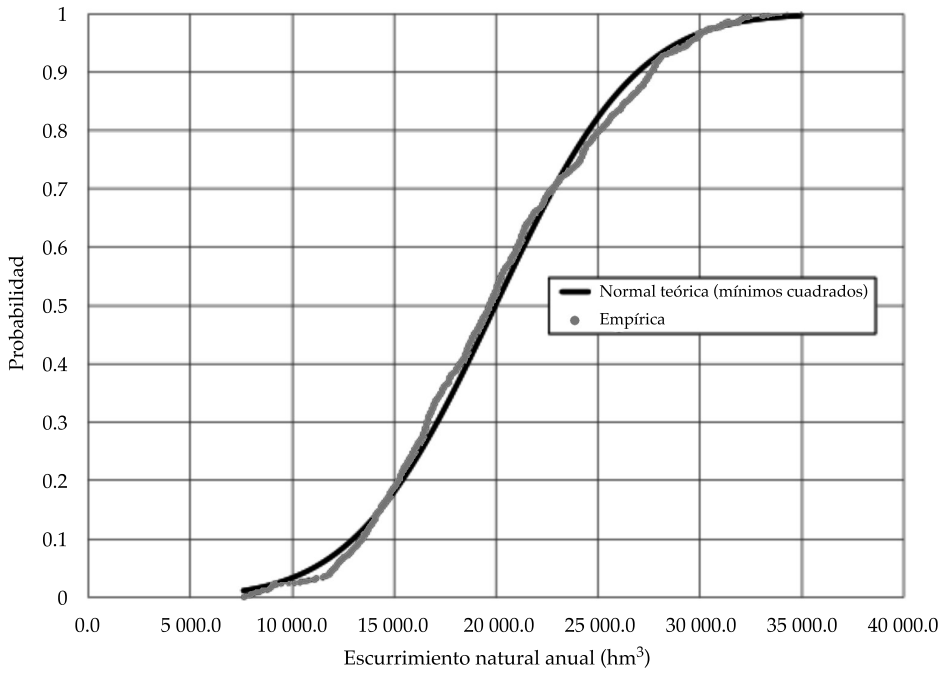


Figura 4. Comparación entre las distribuciones empírica y normal teórica, estimada por el método de mínimos cuadrados, del registro mensual de escurrimientos naturales.

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 167-195
ISSN 2007-2422

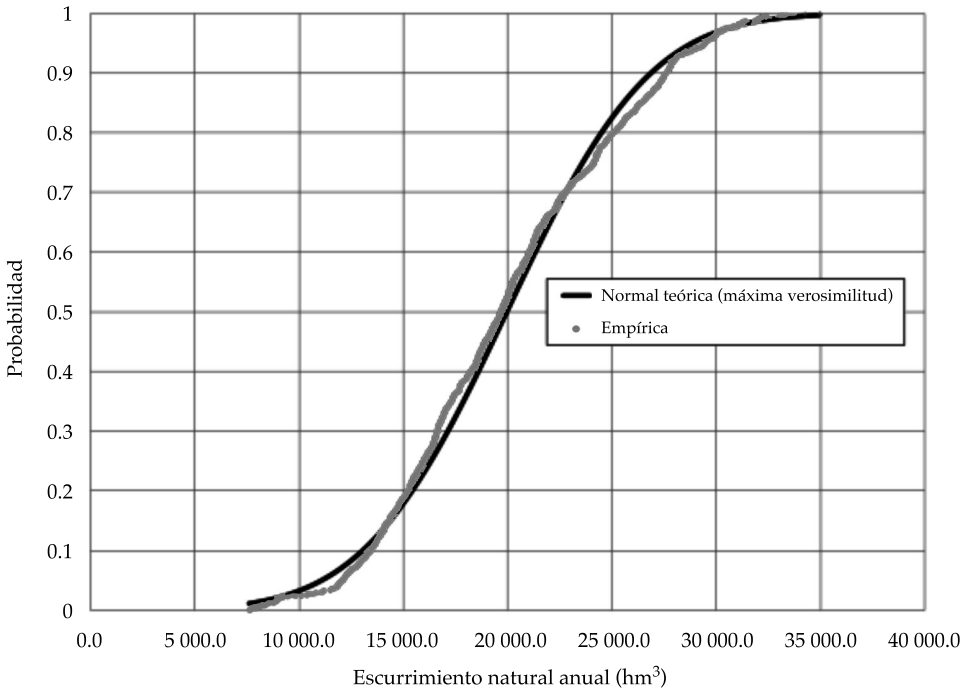


Figura 5. Comparación entre las distribuciones empírica y normal teórica, estimada por el método de máxima verosimilitud, del registro mensual de escurrimientos naturales.

esté dada por:

$$\tilde{\Phi}(x;\mu,\sigma) \equiv \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\int_{-\infty}^{x}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\xi-\mu}{\sigma}\right)^2\right]d\xi \quad (12)$$

Introdúzcase la variable estandarizada z, definida como:

$$z = \frac{x-\mu}{\sigma} \quad (13)$$

Sustituyendo la ecuación (13) en la ecuación (12) se obtiene la así denominada distribución normal estándar:

$$\Phi(z;0,1) \equiv \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{z}\exp\left[-\frac{1}{2}\zeta^2\right]d\zeta \quad (14)$$

Por definición, la media de z es nula y la variancia unitaria.

Nótese que, de acuerdo con la ecuación (13):

$$\begin{aligned} z = -2 &\Rightarrow x = \mu - 2\sigma \\ z = -1 &\Rightarrow x = \mu - \sigma \\ z = 1 &\Rightarrow x = \mu + \sigma \\ z = 2 &\Rightarrow x = \mu + 2\sigma \end{aligned} \quad (15)$$

Dado que la distribución normal estándar está tabulada, se conocen los valores de probabilidad que corresponden a distintos valores de la variable estandarizada z. En efecto, se sabe que:

$$\begin{aligned} z = -2 &\Rightarrow \Phi(-2;0,1) \equiv P(z \le -2) = 2.28\% \\ z = -1 &\Rightarrow \Phi(-1;0,1) \equiv P(z \le -1) = 15.87\% \\ z = 1 &\Rightarrow \Phi(1;0,1) \equiv P(z \le 1) = 84.13\% \\ z = 2 &\Rightarrow \Phi(2;0,1) \equiv P(z \le 2) = 97.72\% \end{aligned} \quad (16)$$

De acuerdo con la ecuación (4.5), $z = -2$ representa el percentil 2.28; $z = -1$, el percentil 15.87; $z = 1$, el percentil 84.13; y $z = 2$, el percentil

97.72 de la distribución normal estándar. Con base en las ecuaciones (13) y (16) es posible escribir que para una variable aleatoria *x que esté normalmente distribuida*:

$$P(x \le \mu - 2\sigma) = P(z \le -2) = 2.28\%$$
$$P(\mu - 2\sigma < x \le \mu - \sigma) = P(-2 < z \le -1) = 13.59\%$$
$$P(\mu - \sigma < x \le \mu + \sigma) = P(-1 < z \le 1) = 68.26\%$$
$$P(\mu + \sigma < x \le \mu + 2\sigma) = P(1 < z \le 2) = 13.59\%$$
$$P(x > \mu + 2\sigma) = P(z > 2) = 2.28\% \qquad (17)$$

Las probabilidades indicadas en la ecuación (17) se ilustran gráficamente en las figuras 6 a 10. Debe subrayarse que las interpretaciones expresadas por la ecuación (17) y en las leyendas de las figuras 6 a 10 sólo son válidas para variables normalmente distribuidas.

No obstante, el concepto de percentil es general y se puede manejar en forma no paramétrica, esto es, sin que esté referido a distribución teórica alguna. En efecto, sea y una variable aleatoria con distribución de probabilidad cualquiera $\Psi(y) \equiv P(\eta \le y)$, donde η es una variable muda. Entonces, por definición, el percentil $\kappa \in [0,1]$ (en fracción) es el valor y_k, tal que $\Psi(y_k) \equiv P(\eta \le y) = \kappa$. En consecuencia, en general la probabilidad de que se presente un valor menor o igual al percentil 2.28 es 2.28%; se presente un valor entre los percentiles 2.28 y 15.87 es 13.59%; se presente un valor entre los percentiles 15.87 y 84.13 es 68.26%; se presente un valor entre los percentiles 84.13 y 97.72 es 13.59%, y se presente un valor mayor al percentil 97.7 es 2.28%.

Con base en la anterior discusión, tiene sentido *definir* un evento aleatorio con valor: "extraordinariamente bajo" al que sea menor que el percentil 2.28; valor "ordinariamente bajo" al que esté entre los percentiles 2.28 y 15.87; "normal" al que esté entre los percentiles 15.87 y 84.13, "ordinariamente alto" al que esté entre los percentiles 84.13 y 97.72; y "extraordinariamente alto" al que sea mayor que el percentil 97.72. Para pronta referencia, a los percentiles 2.28, 15.87, 84.13 y 97.72 se les denominará *percentiles índice*.

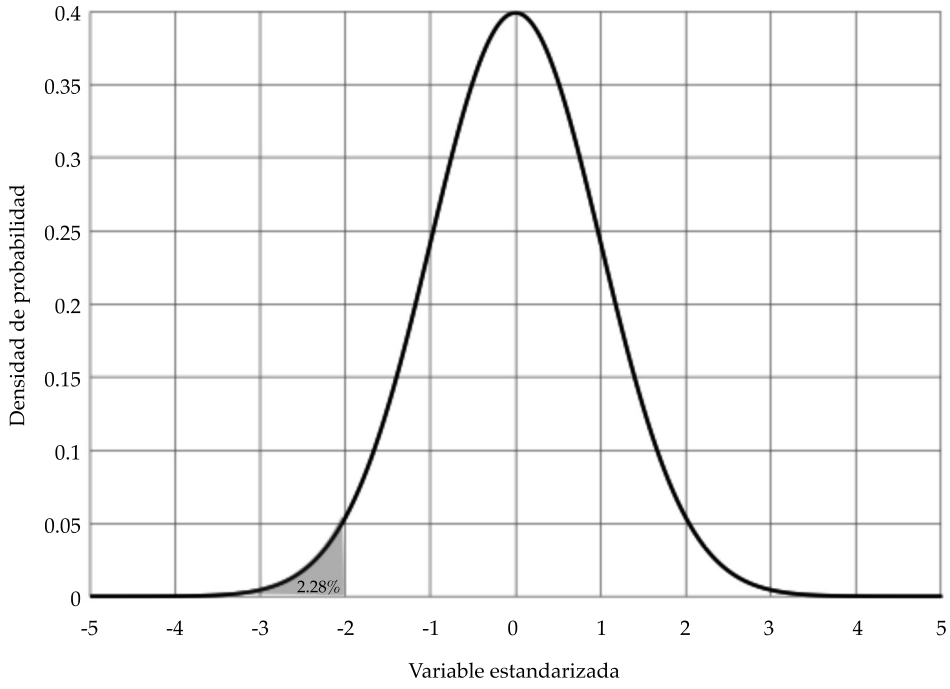


Figura 6. $P(x \le \mu - 2\sigma) = P(z \le -2)$.

ISSN 2007-2422

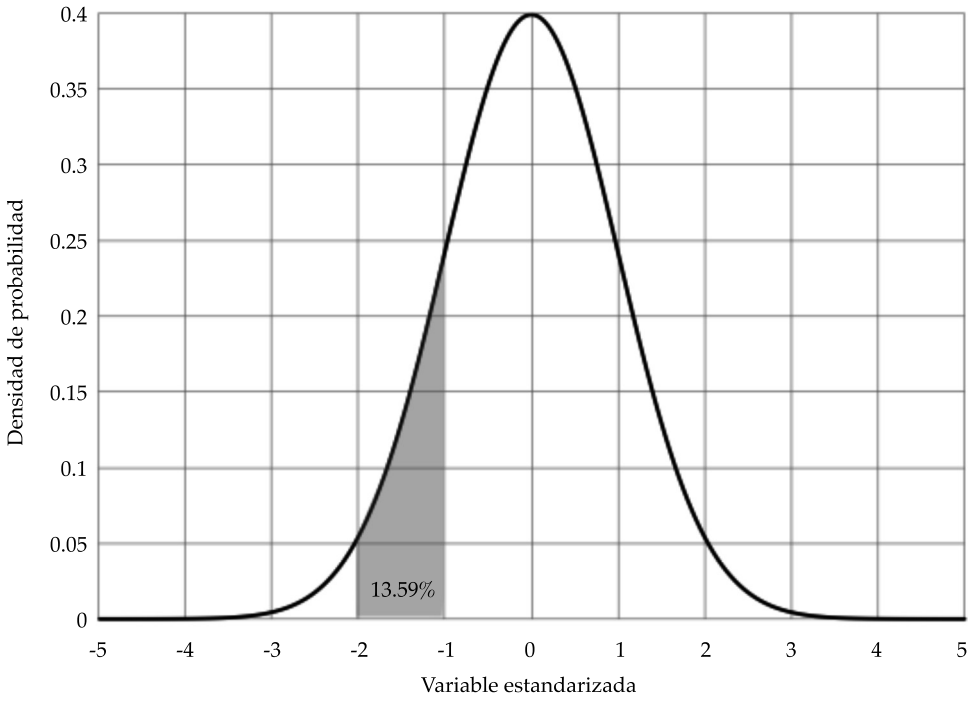


Figura 7. $P(\mu - 2\sigma \leq x \leq \mu - \sigma) = P(-2 \leq z \leq -1)$.

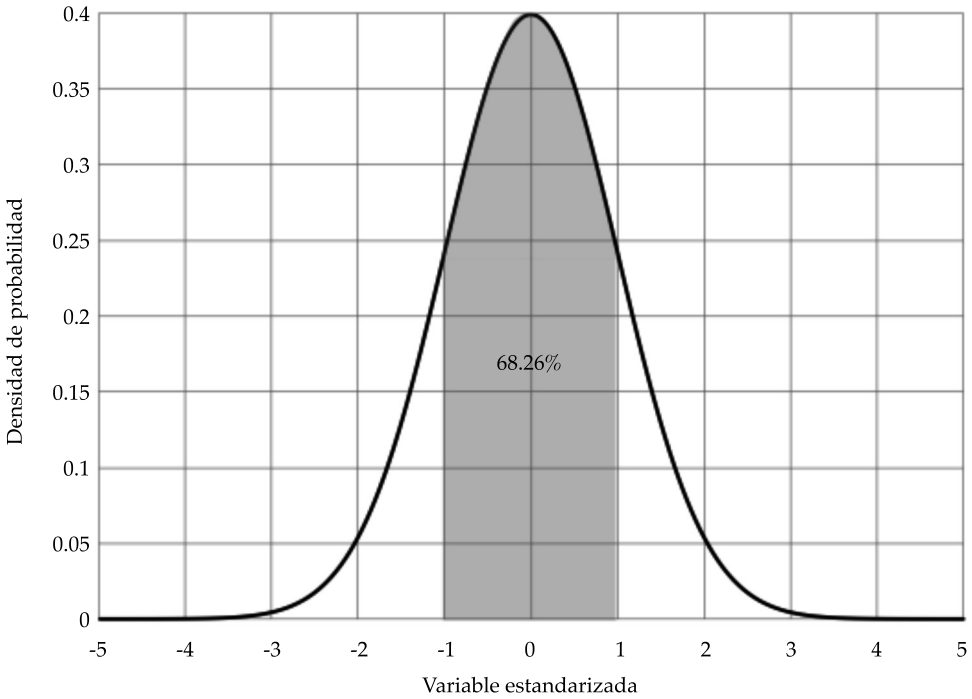


Figura 8. $P(\mu - \sigma \leq x \leq \mu + \sigma) = P(-1 \leq z \leq 1)$.

• ISSN 2007-2422

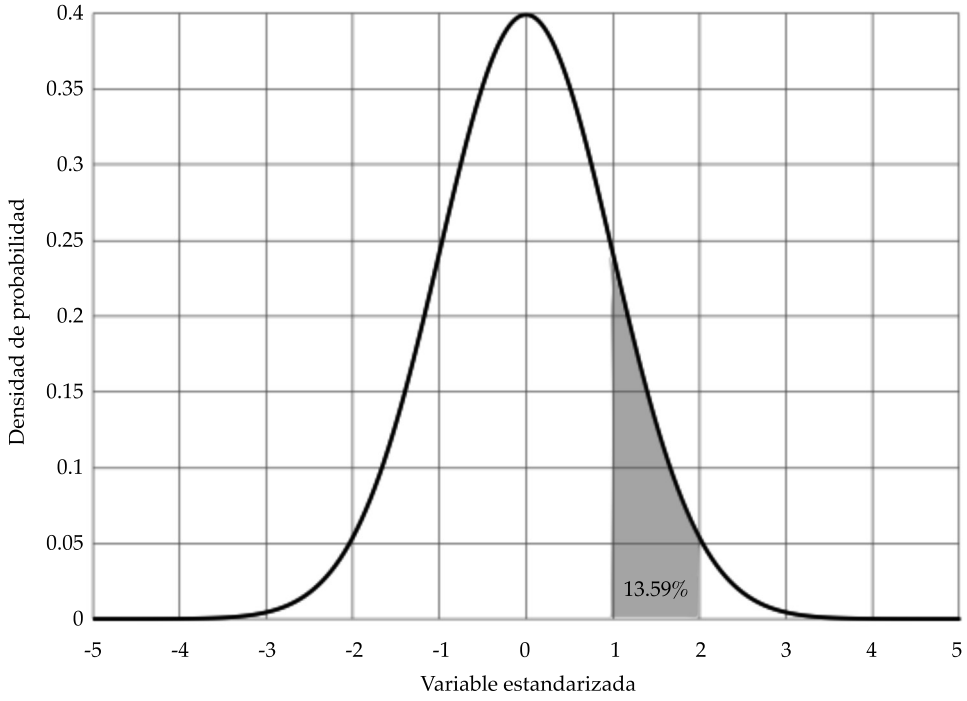


Figura 9. $P(\mu + \sigma \leq x \leq \mu + 2\sigma) = P(1 \leq z \leq 2)$.

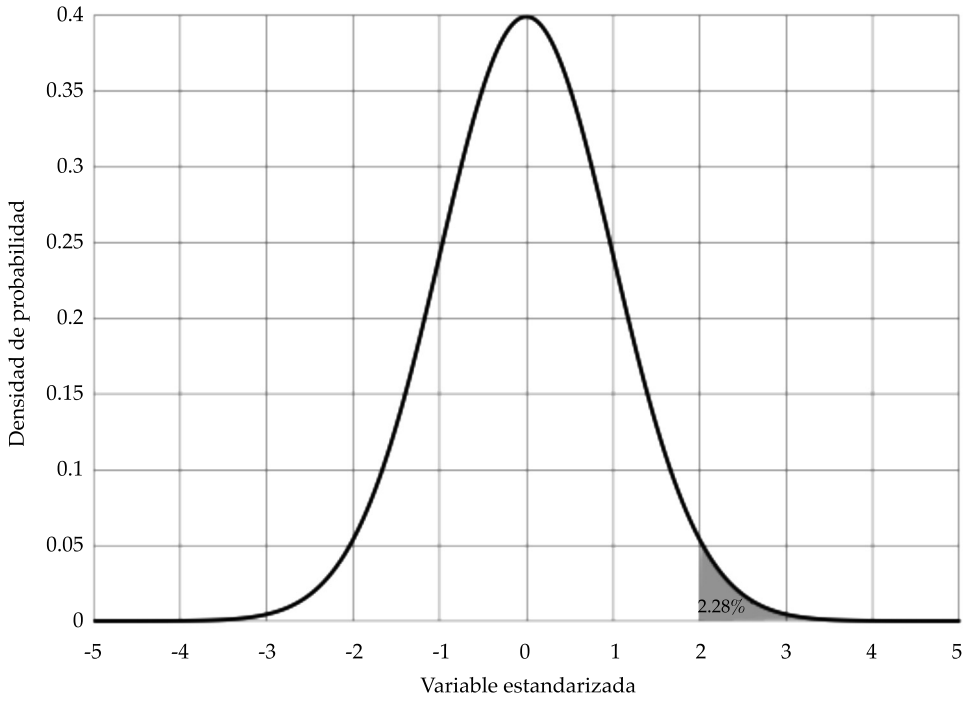


Figura 10. $P(x > \mu + 2\sigma) = P(z > 2)$.

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 167-195
ISSN 2007-2422

Los percentiles índice empíricos de la distribución de probabilidad del registro mensual de escurrimientos anuales mostrada en la figura 2 se tienen en el cuadro 2. En el cuadro 3 se propone una clasificación del registro mensual de escurrimientos anuales basada en los percentiles índice contenidos en el cuadro 2.

En la figura 11 se muestra una representación gráfica de la clasificación de los escurrimientos naturales anuales registrados en el periodo de septiembre de 1906 a diciembre de 2012, utilizando el sistema de clasificación de escurrimientos presentado en el cuadro 3. De acuerdo con la clasificación propuesta en el cuadro 3, dicho sistema, con base en la información disponible en el registro empleado, estadísticamente 2.35% del registro mensual de escurrimientos naturales anuales, se clasificaría como "extraordinariamente escaso"; 13.56%, "escaso"; 68.18%, "normal"; 13.56%, "abundante", y 2.35%, "extraordinariamente abundante". Las pequeñas diferencias entre estos porcentajes observados y los teóricos implicados en el cuadro 2 obedecen a efectos de redondeo.

Determinación de los ciclos naturales del régimen mensual de escurrimientos naturales anuales

De conformidad con la notación introducida en la ecuación (3), sea $R_U \equiv \{U_j\}_{j=0}^{N-1}$ el registro mensual de escurrimientos naturales anuales identificados mediante el índice j que adopta valores enteros progresivos de 0 a $N-1$. También recuérdese que dicho indicador se relaciona con el mes m y el año a del siguiente modo:

$$n = 12(a-1906)+m-9,\ a = 1906, 1907, \ldots, 2012$$

$$\text{donde } m = \begin{cases} 9, 10, \ldots, 12 \text{ si } a = 1906 \\ 1, 2, \ldots, 12 \text{ si } a = 1907, \ldots, 2012 \end{cases} \quad (18)$$

La autocovariancia del registro mensual de escurrimientos naturales anuales se estima como sigue:

$$R_{UU,m} = \frac{1}{N-m}\sum_{j=0}^{N-m-1}(U_j - \overline{U}^N)(U_{j+m} - \overline{U}^N);$$
$$m = 0, 1, \ldots, M \quad (19)$$

Cuadro 2. Percentiles índice empíricos de la distribución de probabilidad del registro mensual de escurrimientos naturales anuales.

Percentil	Valor (hm³)
2.28	9 218.8
15.87	14 394.8
84.13	26 196.3
97.72	30 848.3

Cuadro 3. Clasificación de escurrimientos naturales anuales en el río Colorado.

Clasificación	Porcentaje de probabilidad	Intervalo de escurrimiento anual (hm³)
Extraordinariamente escaso	2.28	Menor o igual que 9 218.8
Escaso	13.59	Mayor que 9 218.8 y menor o igual que 14 394.8
Normal	68.26	Mayor que 14 394.8 y menor o igual que 26 196.3
Abundante	13.59	Mayor que 26 196.3 y menor o igual que 30 848.3
Extraordinariamente abundante	2.28	Mayor que 30 848.3

• ISSN 2007-2422

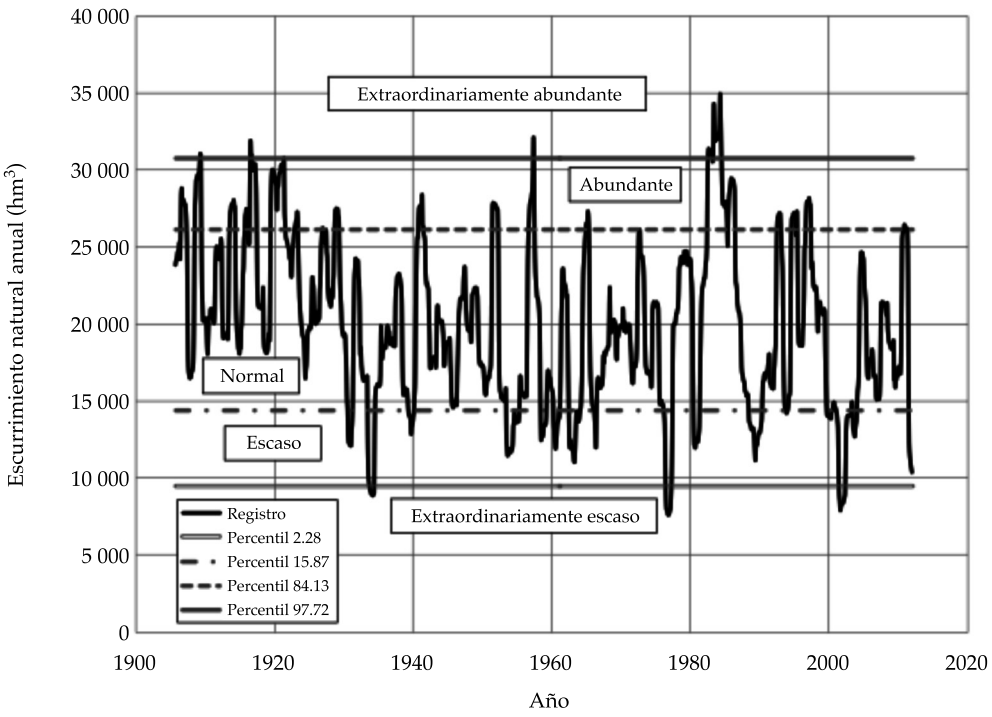


Figura 11. Clasificación de los escurrimientos naturales anuales registrados en el río Colorado.

donde:

$$\overline{U}^{N} = \frac{1}{N}\sum_{j=0}^{N-1} U_j \qquad (20)$$

es la media muestral de los escurrimientos naturales anuales, y $M << N$ es un apropiadamente elegido valor máximo del sesgo discreto (por lo general como una fracción de N).

Por otra parte, la autocovariancia atemperada se estima como:

$$\overline{R}_{UU,m} = w_m R_{UU,m};\ m = 0, 1, \ldots, M \qquad (21)$$

donde w_m es el m-ésimo valor de la ventana de Hann, dada por la siguiente expresión:

$$w_m = \begin{cases} \frac{1}{2}(1+\cos\frac{m\pi}{P});\ m = 0, 1, \ldots, P \\ 0 \qquad\qquad\quad ;\ m = P+1, \ldots, N-1 \end{cases} \qquad (22)$$

La selección de la ventana de Hann para estimar la autocovariancia atemperada se fundamenta en el análisis realizado por Aldama (2010), quien demostró que es la que produce una estimación más suave o estadísticamente estable del espectro, sin dificultar la clara identificación de las frecuencias dominantes.

El espectro discreto se calcula como la transformada de Fourier discreta de la autocovariancia atemperada dada por la ecuación (21). En la práctica se emplea el algoritmo de la "transformada rápida de Fourier" (Stearns, 1975), mismo que funciona con series cuyo número total de datos es igual a una potencia de 2. Por lo anterior, se acostumbra agregar ceros al final de la serie de valores de la autocovariancia, hasta alcanzar la potencia de 2 más cercana. Además, por definición, la autocovariancia es una función par, lo cual se traduce en que el espectro sea real y par. En términos del cálculo de la transformada discreta de Fourier, esto es equivalente a repetir los valores de la imagen especular de la autocovariancia. En términos precisos, se emplea la autocovariancia atemperada extendida, estimada como sigue:

ISSN 2007-2422

$$\overline{R}^{e}_{UU,m} = \begin{cases} \overline{R}_{UU,m} \; ; m = 0, 1, \ldots, M \\ 0 \; ; m = M+1, M+2, \ldots, M^*; M^* = 2^R, R = \left\lceil \dfrac{\ln M}{\ln 2} \right\rceil \\ \overline{R}_{UU,2P^*-m} \; ; m = M^*+1, M^*+2, \ldots, 2M^*-1 \end{cases} \quad (23)$$

donde el símbolo $\lceil \cdot \rceil$ se denomina "techo" y se interpreta como el número entero más pequeño que no es menor que su argumento.

Así, el espectro discreto se estima como sigue:

$$\overline{S}_{UU,n} = \sum_{m=0}^{2M^*-1} \overline{R}^{e}_{UU,m} e^{-i(2\pi mn/2M^*)} \Delta t; n = 0, 1, \ldots, 2M^*-1 \quad (24)$$

donde $\Delta t = 1$ mes, dado que se trabaja con el registro mensual de escurrimientos naturales anuales. Además, en vista de que el espectro es par y la transformada discreta de Fourier es periódica por construcción, sólo son relevantes los valores para $n = 0, 1, \ldots, M$, que corresponden a los valores originales de la autocovariancia atemperada (sin ceros adicionados). Los valores (positivos) respectivos de frecuencia y periodo son:

$$\omega_n = \frac{2\pi n}{2M^*\Delta t} = \frac{\pi n}{M^*\Delta t}; n = 0, 1, \ldots, M \quad (25)$$

$$T_n = \frac{2M^*\Delta t}{n}; n = 0, 1, \ldots, M \quad (26)$$

Se aplicaron las ecuaciones (19), (21) y (23) para calcular la autocovariancia original, la autocovariancia atemperada y la autocovariancia atemperada extendida usando $M = 600$ ($\approx N / 2$), por lo que $M^* = 1\,024$ y $2M^* = 2\,048$. En la figura 12 se muestra la autocovariancia atemperada del registro mensual de los escurrimientos naturales anuales.

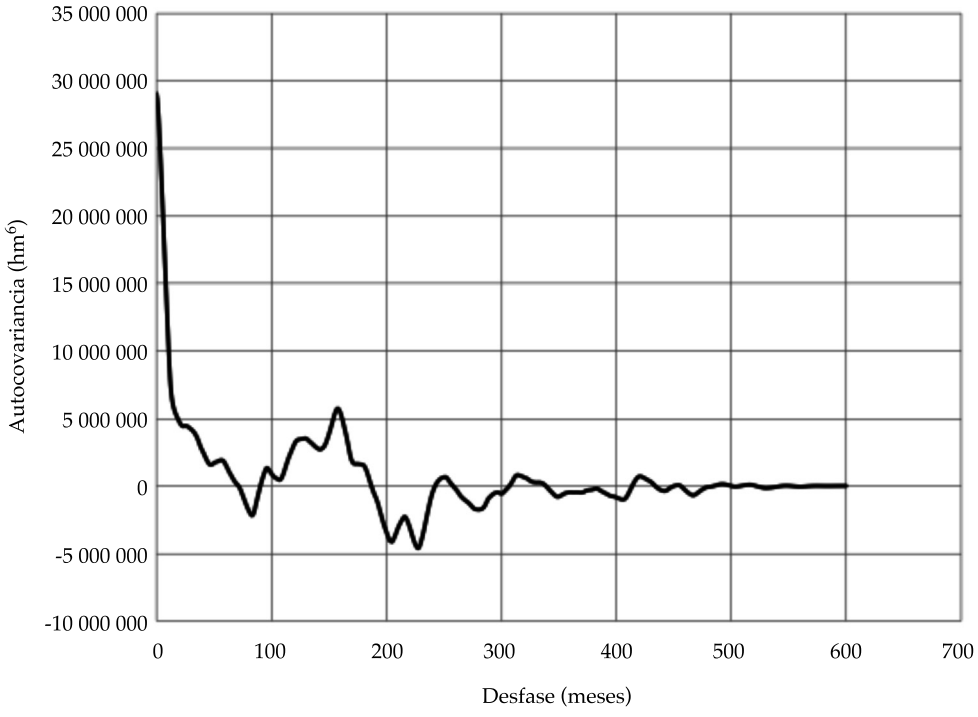


Figura 12. Autocovariancia del registro mensual de escurrimientos anuales del río Colorado, atemperada con la ventana de Hann.

• ISSN 2007-2422

El espectro asociado con el registro mensual de escurrimientos naturales anuales se estimó haciendo uso de la ecuación (24) y su representación gráfica se muestra en la figura 13. Como se puede observar ahí, se identifican claramente tres rangos en el comportamiento del espectro: (1) de altas amplitudes; (2) autosimilar o fractal, en el que el espectro sigue una ley de potencia negativa, y (3) disipativo. En la figura 14 se realzan con círculos trazados con línea discontinua los máximos locales asociados con las frecuencias dominantes en el espectro, mismas que se identifican de modo cuantitativo en el cuadro 4, junto con los periodos que les corresponden. En dicho cuadro se muestran periodos dominantes de alrededor de 60 años y de aproximadamente 7 a 13 años, y de 2 a 5 años. Dichos periodos se han ilustrado en la figura 15, sobre la gráfica de los escurrimientos naturales anuales.

Como se puede observar, el periodo de 60 años se asocia con ciclos largos o súperdecenales, mismos que de manera aproximada se asocian con la recurrencia de eventos extraordinariamente escasos o extraordinariamente abundantes. El periodo de 7 a 13 años se relaciona con ciclos de duración intermedia o decenal, que pueden o no cambiar la clasificación del régimen de escurrimiento, y el de 3 a 5 años se vincula con ciclos cortos o subdecenales que por lo general no cambian la clasificación del régimen de escurrimiento (esto es, todo el ciclo se mantiene como normal, abundante o escaso).

Un nuevo criterio dinámico para la caracterización del régimen de escurrimiento de un río: aplicación al río Colorado.

En vista de que los escurrimientos naturales anuales en la cuenca del río Colorado representan la suma de escurrimientos mensuales y éstos, a su vez, la suma de escurrimientos diarios, así como lo establecido por el teorema del límite central, sería de esperarse que dichos

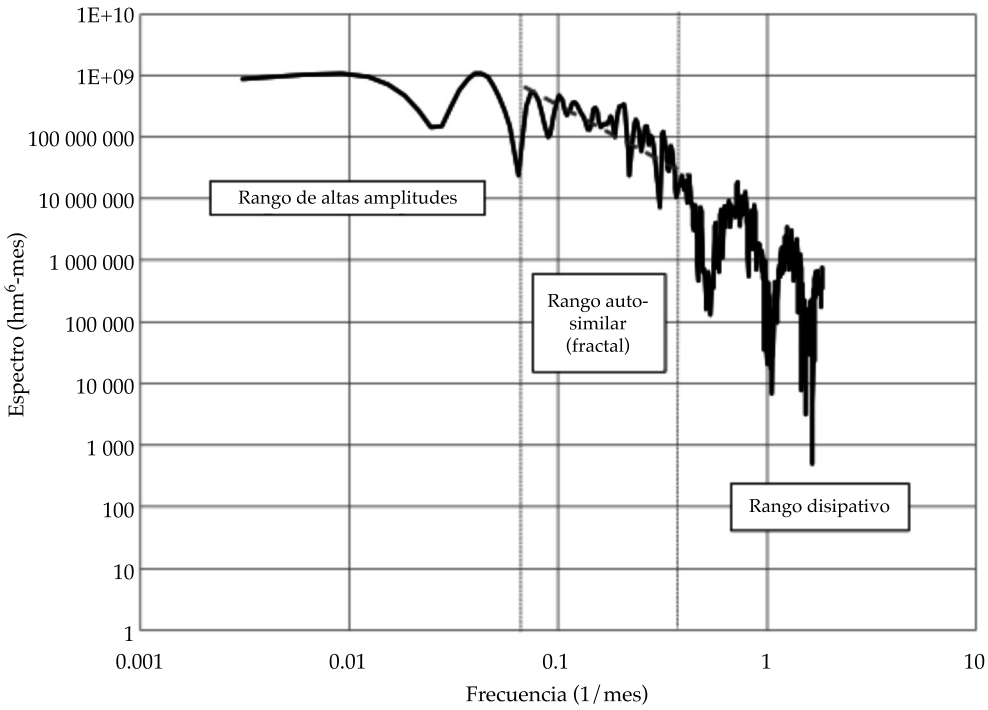


Figura 13. Espectro correspondiente al registro mensual de escurrimientos naturales anuales en la cuenca del río Colorado.

ISSN 2007-2422

Cuadro 4. Frecuencias y periodos dominantes del registro mensual de escurrimientos naturales anuales.

Frecuencia (1/mes)	Periodo (meses)	Periodo (años)
0.0092	682.7	56.7
0.0399	157.5	13.1
0.0736	85.3	7.1
0.1012	62.1	5.1
0.1166	53.9	4.5
0.1963	32.0	2.7

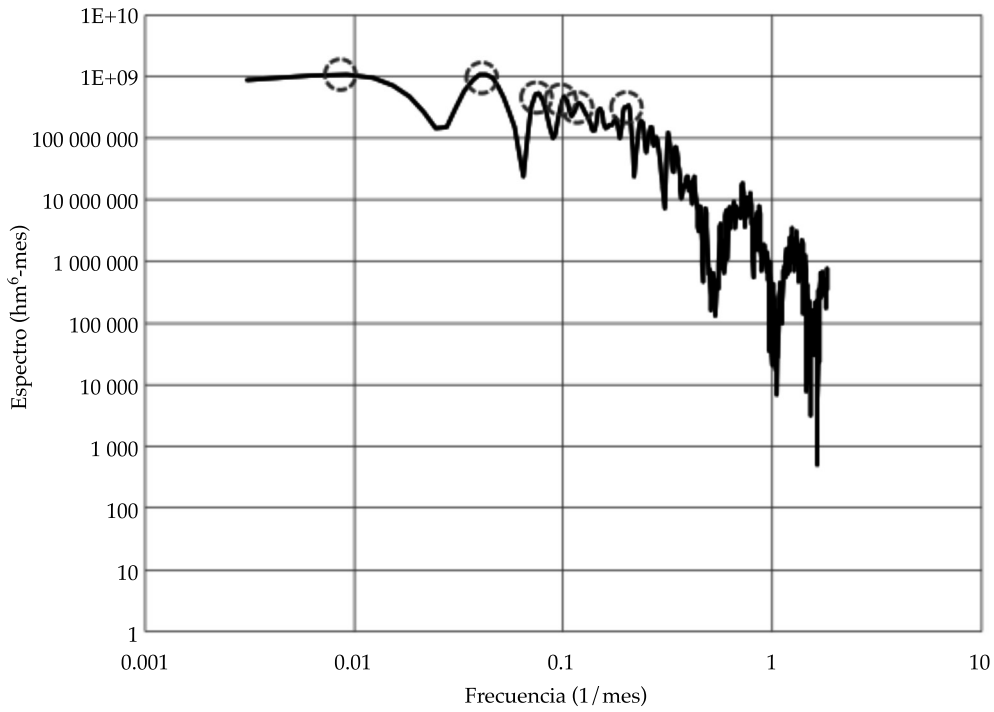


Figura 14. Identificación de frecuencias dominantes en el registro mensual de escurrimientos naturales anuales en la cuenca del río Colorado.

escurrimientos anuales siguieran una distribución normal. No obstante, se ha demostrado que ello no es así. En esta sección se busca entender el porqué de este hecho y se propone una metodología alterna de análisis del régimen de los escurrimientos naturales anuales.

Antes de proceder, es pertinente destacar que el método de clasificación de escurrimientos en términos de percentiles, mismo que es más o menos convencional y que ha sido presentado antes en este trabajo, corresponde a un *criterio estático* debido a que utiliza estadísticos que aplican por igual, con independencia de la fecha en la que haya ocurrido un valor determinado de escurrimiento natural anual que se desee clasificar. De hecho, podría decirse que prácticamente todos los criterios existentes para clasificar el régimen de variables climáticas o hidrológicas son estáticos (como los criterios incluidos en el monitor de sequías de América del Norte; véase por ejemplo, Aldama, 2013). Esto no toma en cuenta que el clima de una re-

• ISSN 2007-2422

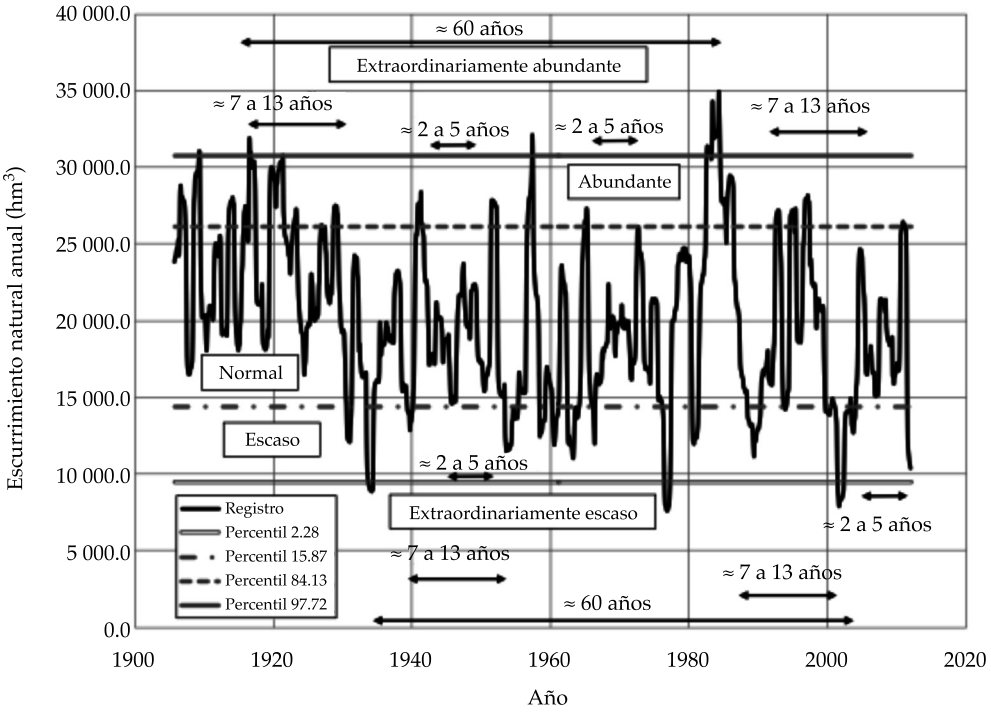


Figura 15. Periodos subdecenales, decenales y superdecenales identificados en el registro mensual de escurrimientos naturales anuales en la cuenca del río Colorado.

gión y el régimen hidrológico de una cuenca son fenómenos dinámicos que poseen variabilidad de pequeña, mediana y gran escala. Al respecto, resulta conveniente recordar las definiciones que propone el *Glosario Hidrológico Internacional* (OMM/UNESCO 2012) para "sequía", como "**ausencia prolongada** o **escasez acusada** de precipitación"; para "sequía hidrológica", como "periodo de **clima anormalmente seco** lo **suficientemente prolongado** para ocasionar una **disminución apreciable en el caudal de los ríos**, nivel de los lagos y/o un agotamiento de la humedad del suelo y un descenso en los niveles de aguas subterráneas por debajo de sus valores normales", y para "clima", como "**síntesis de las condiciones meteorológicas en un lugar determinado, caracterizada por estadísticas a largo plazo** (valores medios, varianzas, probabilidades de valores extremos, etc.) de los elementos meteorológicos en dicho lugar". Las definiciones anteriores ponen de manifiesto que en el estudio del régimen hidrológico de un río es necesario tener en cuenta las estadísticas de largo plazo (algo que sí hacen los criterios estáticos), la desviación respecto de "valores normales" (*ídem*), y la duración de los diferentes estados que puede exhibir dicho régimen (lo cual, por definición, no pueden hacer los criterios estáticos). Queda claro que en el análisis hace falta involucrar a un protagonista fundamental: el tiempo. Al respecto, la experiencia ha demostrado que, además de que pueden existir efectos de largo plazo (lo que ha dado en llamarse "cambio climático"), el clima y la hidrología de una cuenca tienden a exhibir ciertos patrones cíclicos, determinados por la dinámica diurna y estacional del movimiento de la tierra con respecto al motor de los fenómenos climático-oceánico-hidrológicos, esto es, el sol, así como la dinámica anual y multianual de ese astro. A lo anterior se pueden sumar variaciones de pequeña escala que podrían estar

ISSN 2007-2422

determinadas por causas que no son fácilmente discernibles y que sería conveniente caracterizar como inciertas, aleatorias o fortuitas.

Tomando en cuenta la discusión anterior, defínase V_A de la siguiente forma:

$$V_A = V_{m,a} \tag{27}$$

donde, como se recordará, $V_{m,a}$ representa el escurrimiento natural anual correspondiente al mes m del año calendario a, y A representa el año fraccionario, dado por:

$$A = a - 1 + m/12 \tag{28}$$

La ecuación (28) implica que A coincide con a en el mes de diciembre de cada año calendario.

Considérese la siguiente descomposición tripartita del escurrimiento natural anual correspondiente año fraccionario A:

$$V_A = V_A^t + V_A^c + V_A^f \tag{29}$$

donde V_A^t representa la tendencia lineal del escurrimiento natural anual; V_A^c, el componente cíclico, y V_A^f, el componente aleatorio o fortuito de dicho escurrimiento.

A diferencia del análisis estadístico tradicional (*i.e.*, criterios estáticos), que se basa en suponer que todo el escurrimiento natural anual es una variable aleatoria, en la ecuación (29) se postula que el escurrimiento está compuesto por una *componente determinista* dada por $V_A^t + V_A^c$ y una *componente aleatoria o fortuita*, dada por V_A^f. Con fundamento en el teorema del límite central, si la ecuación (29) es correcta, la componente aleatoria V_A^f poseerá una distribución normal. Lo anterior, en vista de que la descomposición (29) es lineal y homogénea, por lo que es de esperarse que tanto la tendencia como el componente cíclico y el componente aleatorio puedan expresarse como la suma de sus correspondientes contrapartes para el escurrimiento natural diario para todo el año. A continuación se presenta una metodología para determinar cada una de las tres componentes del escurrimiento natural anual que intervienen en la ecuación (29).

La ecuación (29) es el modelo más simple o parsimonioso (en el sentido del principio de la parsimonia o "Navaja de Ockham", Audi, 1999) que captura las características deseables en un criterio de caracterización dinámico, ya que, como quedará claro en la líneas subsecuentes, el elemento tiempo interviene de manera directa en la determinación tanto de la componente tendencial como la cíclica.

La tendencia del escurrimiento natural anual (V_A^t) se obtiene por simple regresión, como se acostumbra hacerlo en análisis de series de tiempo (Falk *et al*., 2006). Utilizando los datos del registro de escurrimientos naturales $R_V \equiv \{[V_{m,a}]_{a=1906}\}_{m=9}^{12} \cup \{[V_{m,a}]_{a=1907}^{2010}\}_{m=1}^{12}$, se obtiene la siguiente expresión para la tendencia del escurrimiento natural anual:

$$V_A^t = \alpha A + \beta \tag{30}$$

donde $\alpha = -41.6166697876027$ hm^3/año y $\beta = 101\,493.046478986$ hm^3. En la figura 16 se muestra una representación gráfica de la tendencia de escurrimiento natural anual en el río Colorado.

Ahora bien, defínase el primer residuo de escurrimiento natural anual, $V_A^{(1)}$, como la diferencia entre el escurrimiento natural anual y su tendencia, esto es:

$$V_A^{(1)} = V_A - V_A^t = V_A^c + V_A^f \tag{31}$$

donde en la última igualdad se ha empleado la ecuación (29). En analogía con las ecuaciones (3) y (4), teniendo en mente la ecuación (28), se pueden definir los elementos del conjunto de primeros residuos identificados con un índice consecutivo, $\{U_j^{(1)}\}_{j=0}^{N-1}$, como sigue:

$$U_{12(a-1906)+m-9}^{(1)} = V_{a-1+m/12}^{(1)},\ a = 1906, 1907, \ldots, 2012$$

$$\text{donde } m = \begin{cases} 9, 10, \ldots, 12 \text{ si } a = 1906 \\ 1, 2, \ldots, 12 \text{ si } a = 1907, \ldots, 2012 \end{cases} \tag{32}$$

Exprésense dichos elementos mediante una representación discreta de Fourier, esto es:

• ISSN 2007-2422

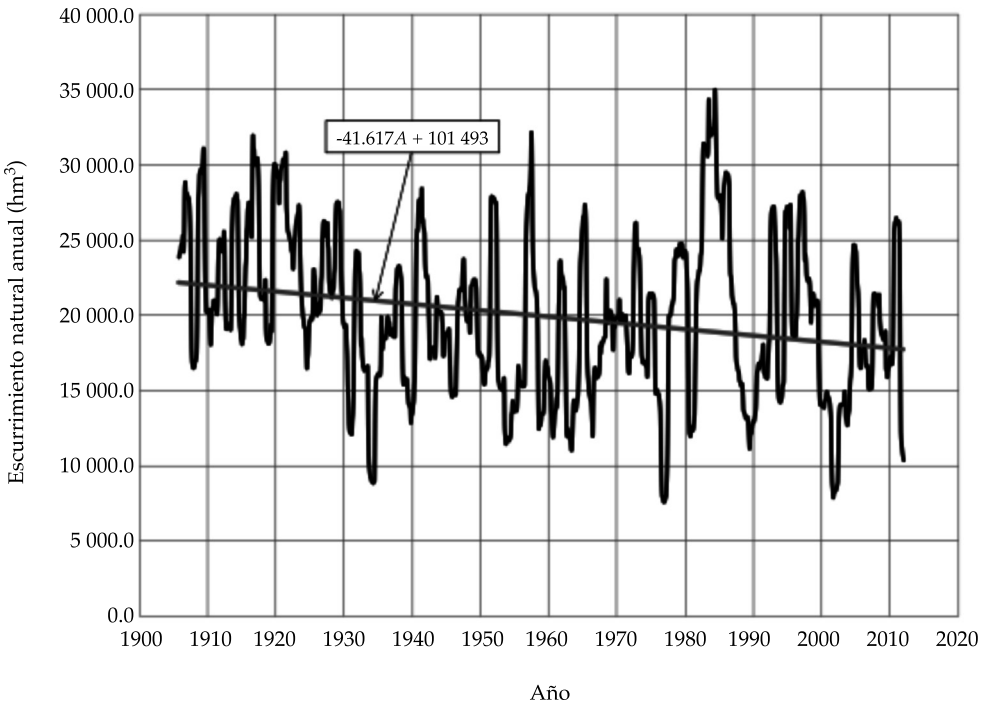


Figura 16. Tendencia del registro mensual de escurrimientos naturales anuales en la cuenca del río Colorado.

$$U_j^{(1)} = \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{U}_k^{(1)} e^{i(2\pi jk/N)} \Delta\omega;\ j = 0, 1, \ldots, N-1 \quad (33)$$

donde los coeficientes de Fourier ($\{\tilde{U}_k^{(1)}\}_{j=0}^{N-1}$) están dados por la transformada discreta de Fourier de los primeros residuos ($\{U_j^{(1)}\}_{j=0}^{N-1}$):

$$\tilde{U}_k^{(1)} = \tilde{\mathscr{F}}_k[\{U_j^{(1)}\}_{j=0}^{N-1}] = \sum_{j=0}^{N-1} U_j^{(1)} e^{-i(2\pi jk/N)} \Delta t;$$
$$k = 0, 1, \ldots, N-1 \quad (34)$$

donde la tilde y $\tilde{\mathscr{F}}_k[\cdot]$ denotan la transformada discreta de Fourier y Δt es el intervalo de tiempo que separa a los distintos valores de los escurrimientos naturales anuales (en el presente caso, un mes). La frecuencia a la que corresponde el valor de $\tilde{U}_k^{(1)}$ es:

$$\omega_k \equiv k\Delta\omega = \frac{2\pi k}{N\Delta t} = \frac{2\pi}{T_k};\ k = 0, 1, \ldots, N-1 \quad (35)$$

donde $\Delta\omega$ representa el intervalo de frecuencia que separa los distintos valores de $\tilde{U}_k^{(1)}$, y T_k, el periodo asociado con ω_k. Evidentemente, dichos parámetros están dados por las siguientes expresiones:

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{N\Delta t} \quad (36)$$

$$T_k = \frac{N\Delta t}{k};\ k = 0, 1, \ldots, N-1 \quad (37)$$

Las ecuaciones (33) y (34) constituyen el par discreto de Fourier de los primeros residuos de los escurrimientos naturales anuales.

El periodograma de $\{U_j^{(1)}\}_{j=0}^{N-1}$ constituye el estimador-base de su espectro (Stearns, 1975), y se define como:

$$\mathscr{P}_k = \left|\tilde{U}_k^{(1)}\right|^2 \equiv \tilde{U}_k^{(1)}[\tilde{U}_k^{(1)}]^*;\ k = 0, 1, \ldots, N-1 \quad (38)$$

donde el asterisco denota conjugado complejo. En este trabajo se postula que el componente cíclico del escurrimiento natural anual (V_A^c)

ISSN 2007-2422

corresponde a la reconstrucción de Fourier que contenga los modos dominantes del periodograma $\mathscr{P}_k$.

Los elementos del conjunto de componentes cíclicos identificados con un índice consecutivo ($\{U_j^c\}_{j=0}^{N-1}$) se definen como sigue:

$$U^c_{12(a-1906)+m-9} = V^c_{a-1+m/12},\ a = 1906, 1907, \ldots, 200$$

$$\text{donde } m = \begin{cases} 9, 10, ..., 12 \text{ si } a = 1906 \\ 1, 2, \ldots, 12 \text{ si } a = 1907, \ldots, 2012 \end{cases} \quad (39)$$

De manera similar, los elementos del conjunto de componentes aleatorios identificados con un índice consecutivo ($\{U_j^f\}_{j=0}^{N-1}$) se definen como sigue:

$$U^f_{12(a-1906)+m-9} = V^f_{a-1+m/12},\ a = 1906, 1907, \ldots, 2008$$

$$\text{donde } m = \begin{cases} 9, 10, ..., 12 \text{ si } a = 1906 \\ 1, 2, \ldots, 12 \text{ si } a = 1907, \ldots, 2012 \end{cases} \quad (40)$$

Ahora bien, los modos dominantes de Fourier son aquéllos que corresponden a los valores mayores de $\mathscr{P}_k$. A continuación se desarrolla un método para determinarlos. El valor máximo del periodograma está dado por:

$$\mathscr{P}_{\text{máx}} = \max_k \mathscr{P}_k \quad (41)$$

Defínase el periodograma condicional ($\mathscr{P}_k^{\text{cond}}$) de la siguiente manera:

$$\mathscr{P}_k^{\text{cond}} = \mathscr{H}[\mathscr{P}_k - \rho\mathscr{P}_{\text{máx}}]\mathscr{P}_k \quad (42)$$

donde $0 < \rho < 1$ es la fracción de $\mathscr{P}_{\text{máx}}$, que define la condición de corte de las amplitudes del periodograma, y $\mathscr{H}[\cdot]$ es la función escalón unitario de Heaviside, dada por:

$$\mathscr{H}[\zeta] = \begin{cases} 0 \text{ si } \zeta < 0 \\ 1 \text{ si } \zeta \geq 0 \end{cases} \quad (43)$$

Como puede entonces observarse, la ecuación (42) deja intactos los valores del periodograma $\mathscr{P}_k$, que son mayores o iguales que el valor de corte $\rho\mathscr{P}_{\text{máx}}$, haciendo cero el resto. Evidentemente, si se permitiere a ρ asumir el valor de cero, el periodograma condicional sería igual al periodograma original. De hecho, cuanto más cercana esté ρ de cero, tanto más parecido será $\mathscr{P}_k^{\text{cond}}$ a $\mathscr{P}_k$.

Supóngase que el valor de ρ fuere conocido, entonces el componente cíclico del escurrimiento natural anual (U_j^c) estaría dado por la reconstrucción condicional de Fourier, que involucra sólo a los nodos supervivientes del tamiz involucrado en la definición del periodograma condicional a través de la ecuación (42), esto es:

$$U_j^c = \sum_{k=0}^{N-1} \mathscr{H}[\mathscr{P}_k - \rho\mathscr{P}_{\text{máx}}]\tilde{U}_k^{(1)} e^{i(2\pi jk/N)}\Delta\omega;$$

$$j = 0, 1, ..., N-1 \quad (44)$$

Por las razones antes expuestas, mientras más pequeña sea ρ, más cercano será U_j^c a $U_j^{(1)}$ y, por tanto, más pequeño será U_j^f, pues de conformidad con la ecuaciones (31) y (32):

$$U_j^f = U_j^{(1)} - U_j^c \quad (45)$$

La descomposición tripartita del escurrimiento anual, dada por la ecuación (29), *prescribe* que dicha variable está dada por la suma de un componente *determinista*, dado por la suma de la tendencia y el componente cíclico, y un componente *aleatorio*. Por tanto, si el primero crece, el segundo debe menguar. Pero es precisamente el componente aleatorio U_j^f el que permite caracterizar probabilistamente la incertidumbre en el comportamiento de los escurrimientos naturales anuales. A fin de no sesgar la descripción del régimen de escurrimiento a través del modelo representado por la ecuación (29), se buscará maximizar la variancia explicada por el componente aleatorio, U_j^f. No obstante, en vista de lo establecido por el teorema del límite central, dicho componente debe poseer una distribución normal.

Tomando en cuenta lo anterior, se propone la determinación de los componentes cíclico y aleatorio del primer residuo de escurrimientos naturales anuales a través de la solución del siguiente problema de optimización no lineal:

• ISSN 2007-2422

$$\rho^* = \max_{0<\rho<1} \rho$$

tal que:

$$U_j^c = \sum_{k=0}^{N_c-1} \mathscr{H}[\mathscr{P}_k - \rho\mathscr{P}_{máx}]\tilde{U}_k^{(1)} e^{i(2\pi jk/N_c)}\Delta\omega;\ j = 0, 1, \ldots, N-1;\ \text{y}$$

$$U_j^f = U_j^{(1)} - U_j^c;\ j = 0, 1, \ldots, N-1 \quad \text{posea una distribución normal} \qquad (46)$$

Se aplicó el método descrito al análisis del registro mensual de escurrimientos naturales anuales del río Colorado. En la figura 17 se muestra una representación gráfica de los primeros residuos, calculados por medio de la ecuación (31). En otras palabras, dicha figura indica el registro mensual de escurrimientos naturales anuales *sin tendencia* (por tanto, su media es nula).

Es pertinente hacer notar que para la aplicación práctica de las ecuaciones (33) a (46) es necesario incrementar el número de elementos del conjunto $\{U_j^{(1)}\}_{j=0}^{N-1}$, de modo que sea posible el uso de la transformada rápida de Fourier. Esto implica la inclusión de elementos nulos de la siguiente forma: $U_j^{(1)} = 0$ para $j = N, N+1, \ldots, N^*$, donde N^* es la potencia de 2 más cercana (desde arriba) a N. En este caso, entonces, se sustituye, donde sea aplicable, $N = 1\,276$ por $N^* = 2\,048$ en las ecuaciones (33) a (46).

Se resolvió numéricamente el problema de optimación planteado por la ecuación (46) y se obtuvo que el valor óptimo de la fracción de corte para el registro mensual disponible es $\rho = 0.4$. Se calculó el componente cíclico mediante la reconstrucción condicional de Fourier expresada por la ecuación (44), y el segundo residuo o componente aleatorio, mediante la ecuación (45). Debe hacerse notar que las frecuencias que contienen el componente cíclico del primer residuo son esencialmente las mismas que se determinaron mediante el análisis espectral realizado antes.

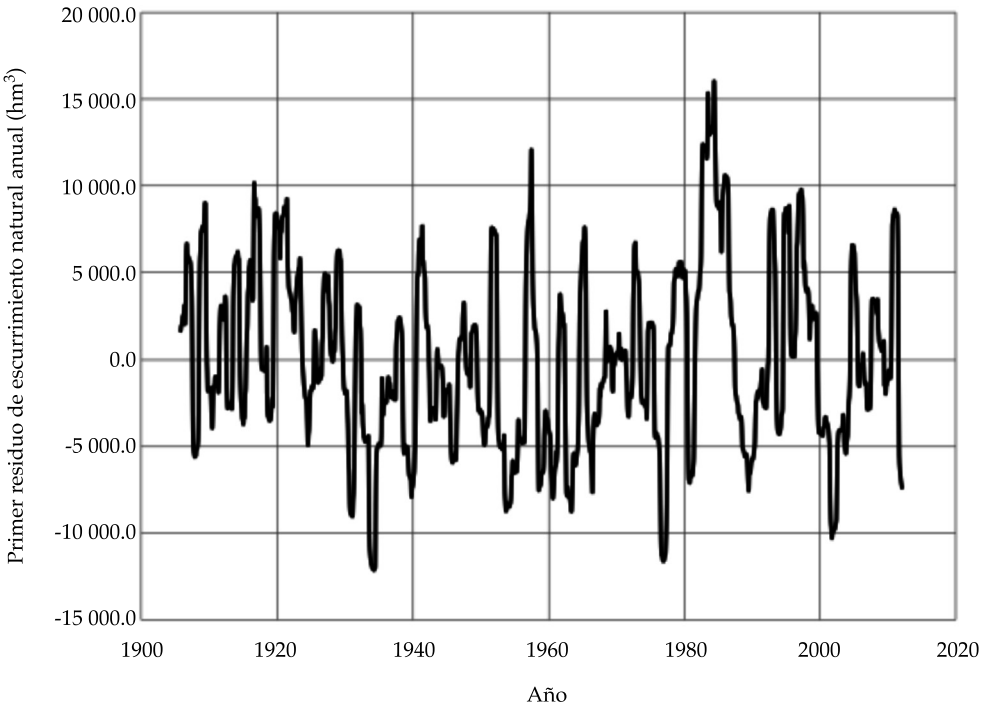


Figura 17. Primer residuo de escurrimiento natural anual en el río Colorado.

ISSN 2007-2422

En la figura 18 se muestra una comparación entre el primer residuo y el componente cíclico. Puede observarse que el componente cíclico tiene un comportamiento similar al del primer residuo, pero que sus oscilaciones son más suaves y de menor amplitud. Por otra parte, en la figura 19 se muestra el componente aleatorio. Se observa que la variabilidad de éste es significativamente menor que la del primer residuo. De hecho, hay una disminución de 49.5% en la variancia.

Resta demostrar que el componente aleatorio se distribuya de manera normal. En las figuras 20 a 22 se muestran las comparaciones entre la distribución empírica de probabilidad de dicho componente y las distribuciones normales teóricas, con parámetros estimados mediante los métodos de momentos, mínimos cuadrados y máxima verosimilitud. Como puede observarse, el ajuste es muy satisfactorio en los tres casos.

En términos cuantitativos, se aplicó la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov, empleando la ecuación (9), y se obtuvieron los siguientes resultados: $D = 0.0365$, con parámetros estimados mediante el método de momentos; $D = 0.0370$, con parámetros estimados mediante el método de mínimos cuadrados; $D = 0.0364$, con parámetros estimados mediante el método de máxima verosimilitud. Dado que en los tres casos, $D < D_{cr} = 0.0388$, se concluye que con un nivel de significancia de 5%, el componente aleatorio se distribuye de forma normal. Esto confirma la expectativa planteada al inicio, a la luz de lo establecido por el teorema del límite central. En vista de que el ajuste es mejor, en términos de D, para los parámetros estimados mediante el método de máxima verosimilitud (además de que arroja estimadores consistentes; Hogg, McKean, & Craig, 2012), se decidió emplear los valores correspondientes para la media ($\overline{U}^f$) y desviación estándar (S_{U^f}), mismos que resultaron ser 0 hm^3 (como era de esperarse) y 3 731.18 hm^3, respectivamente.

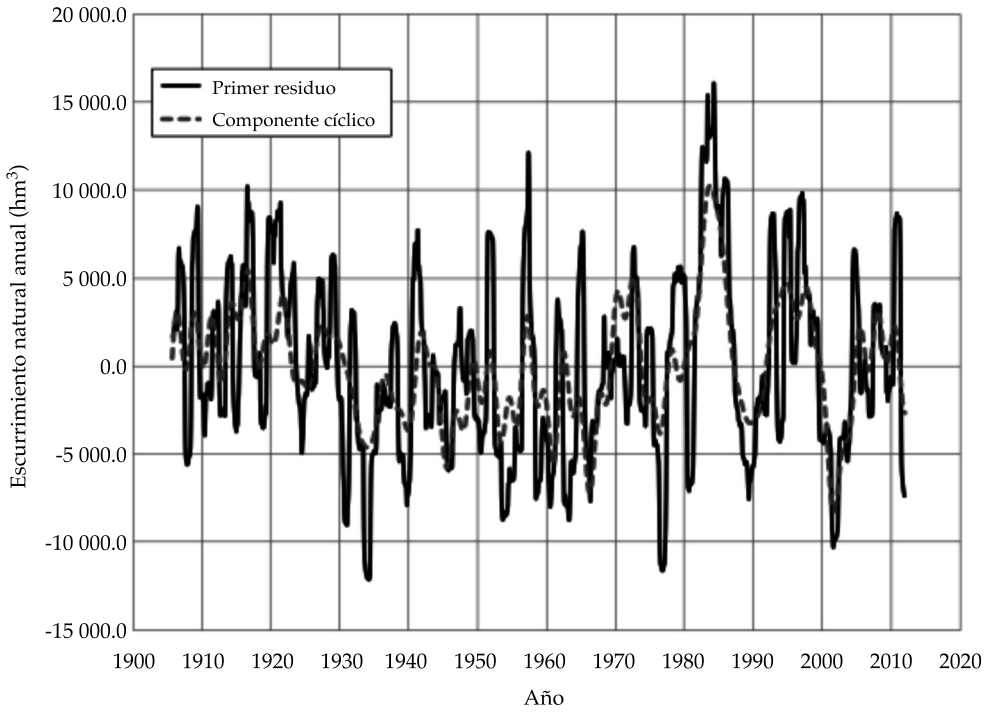


Figura 18. Comparación entre el primer residuo y el componente cíclico del escurrimiento natural anual del río Colorado.

• ISSN 2007-2422

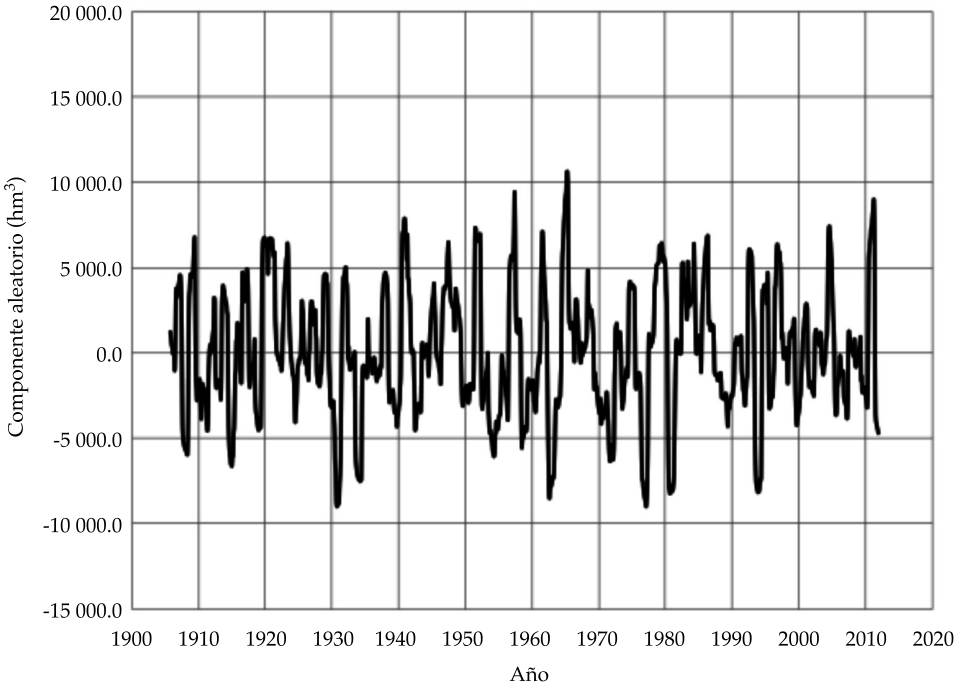


Figura 19. Componente aleatorio del escurrimiento natural anual del río Colorado.

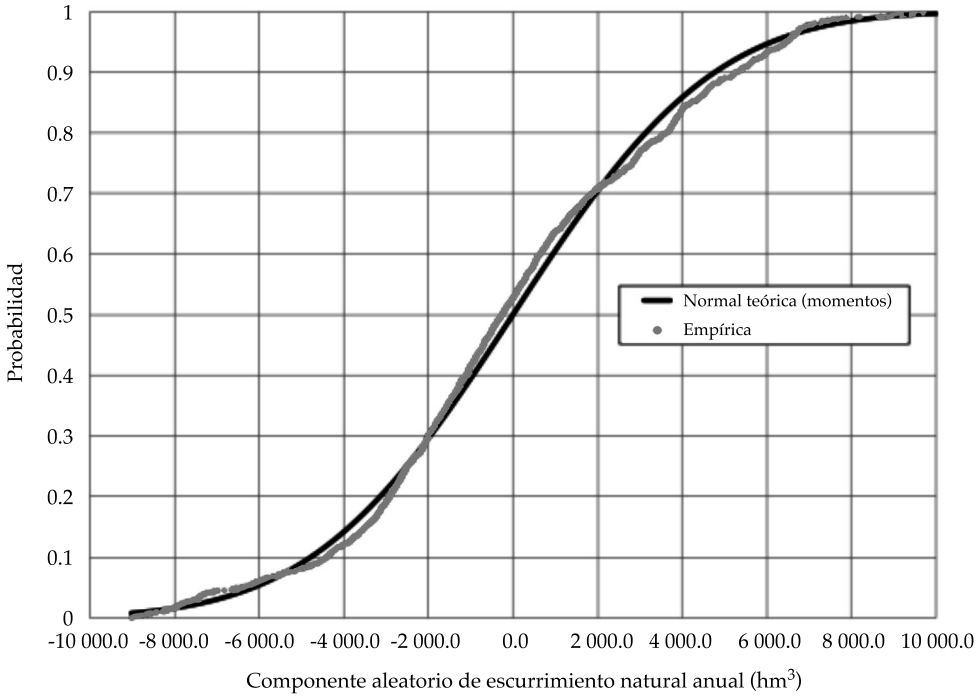


Figura 20. Comparación entre la distribución empírica de probabilidad del componente aleatorio y la distribución normal con parámetros estimados empleando el método de momentos.

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 167-195
ISSN 2007-2422

Se propone ahora un nuevo índice para *clasificar hidrológicamente* el régimen de escurrimientos naturales de una cuenca. La denominación respectiva es la de "índice dinámico estandarizado de escurrimiento" o *DSRI* (abreviatura de *Dynamic Standarized Runoff Index*, en analogía al *SPI*, abreviatura de *Standarized Precipitation Index*, y de *SDI*, *Standarized Drought Index*; véase Nalbantis & Tsakiris, 2009).

El *DSRI* se define como la diferencia entre el componente aleatorio del escurrimiento natural y su media, normalizada al dividirse entre la desviación estándar correspondiente. Empleando la notación de los componentes aleatorios del escurrimiento natural anual en el río Colorado, se tiene que:

$$DSRI_j^{(C)} = \frac{U_j^f - \overline{U}^f}{S_{U^f}} \qquad (47)$$

En el cuadro 5 se muestra la clasificación propuesta en términos del *DSRI*.

Debe recordarse que el componente aleatorio es la diferencia entre el escurrimiento natural anual y la suma de la tendencia y el componente cíclico. Por tanto, $DSRI = k$ significa que el escurrimiento difiere en k veces la desviación estándar del componente aleatorio de dicha suma. En la figura 23 se muestra una comparación entre el escurrimiento natural y la suma de la tendencia, y el componente cíclico, misma que corresponde a $DSRI = 0$.

El *DSRI* reconoce que la condición de normalidad no se puede caracterizar con un valor, sino con un rango. Por otra parte, dado que la suma de la tendencia y el componente cíclico es variable en el tiempo, también lo serán los límites entre los diversos rubros de clasificación contenidos en el cuadro 7. Es esto lo que da el carácter dinámico al *DSRI*. Nalbantis y Tsakiris (2009), así como otros autores, han asignado probabilidades a rangos de índices empleados por ellos con base en la distribución normal sin demostrar que los datos que han empleado se

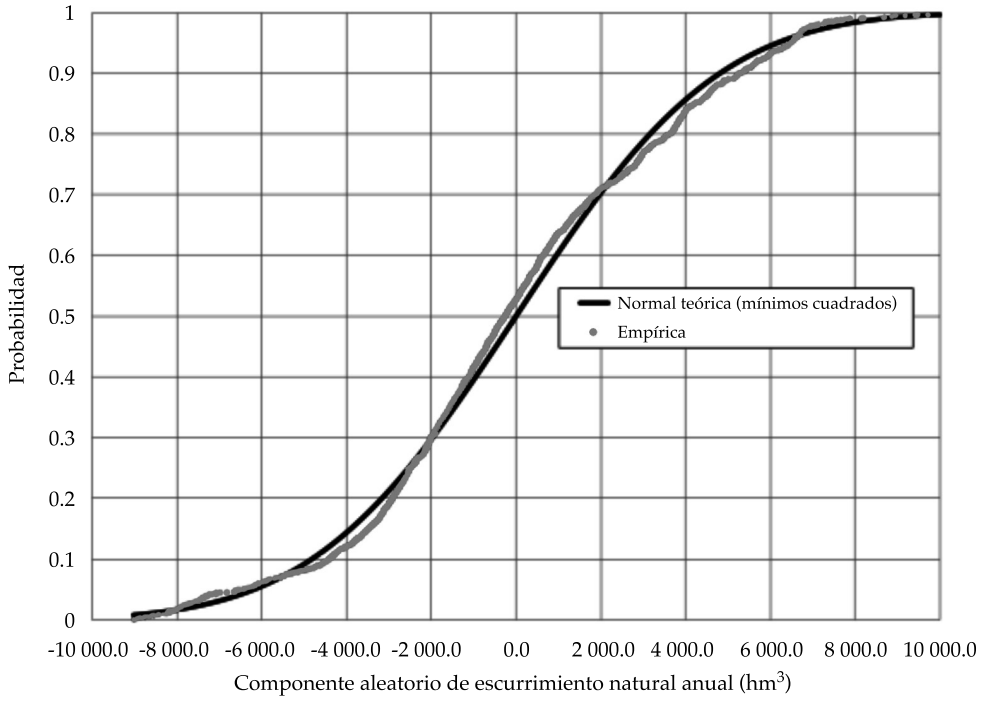


Figura 21. Comparación entre la distribución empírica de probabilidad del componente aleatorio y la distribución normal con parámetros estimados empleando el método de mínimos cuadrados.

• ISSN 2007-2422

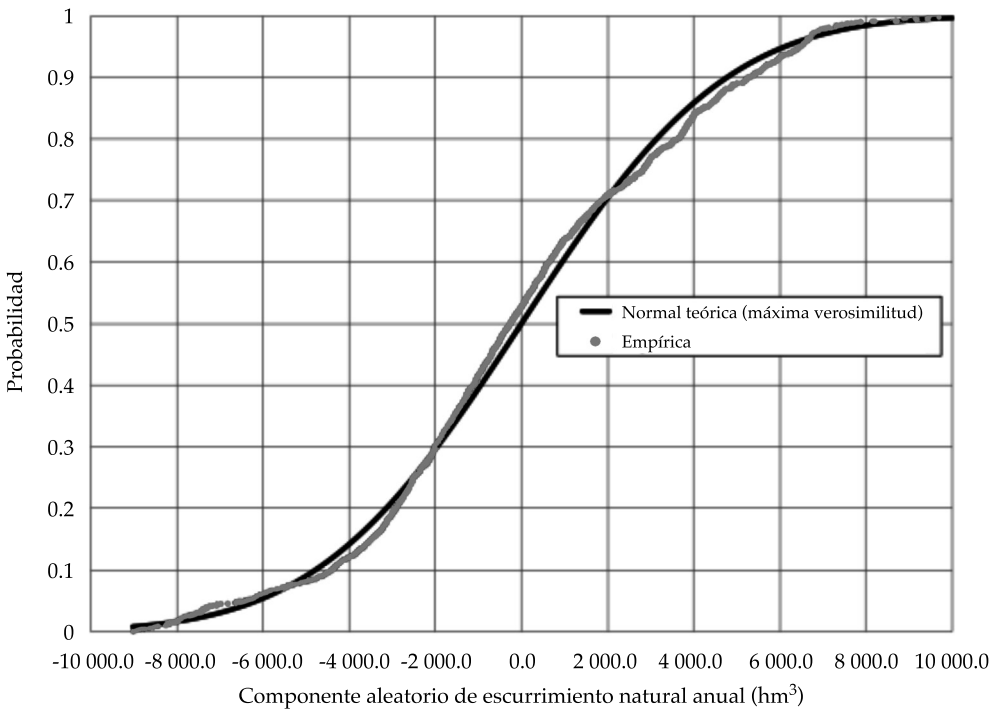


Figura 22. Comparación entre la distribución empírica de probabilidad del componente aleatorio y la distribución normal con parámetros estimados empleando el método de mínimos cuadrados.

Cuadro 5. Clasificación de escurrimientos en términos del índice dinámico estandarizado de escurrimiento.

Criterio	Clasificación	Probabilidad (%)
$DSRI > 2$	Muy húmedo	2.28
$1 < DSRI \leq 2$	Húmedo	13.59
$-1 < DSRI \leq 1$	Normal	68.26
$-2 < DSRI \leq -1$	Seco	13.59
$DSRI \leq -2$	Muy seco	2.28

distribuyan de modo normal. A diferencia de lo anterior, el *DSRI garantiza* por definición que los datos a los que se le aplica sean normalmente distribuidos. Las probabilidades consignadas en el cuadro 5 son congruentes con esta observación, dado que corresponden a las probabilidades de la componente aleatoria del escurrimiento natural anual.

En las figura 24 se muestra la clasificación de escurrimientos naturales anuales en la cuenca del río Colorado, hasta el punto de entrega de agua a México, en los términos del Tratado de 1944. Puede observarse que la condición de *normalidad* corresponde a la zona entre $DSRI = -1$ y $DSRI = 1$, lo cual reconoce que el clima y sus efectos tienen variaciones periódicas, además de ciclos de gran escala que pueden manifestarse como tendencias.

De acuerdo con el *DSRI*, en el periodo de octubre de 1906 a diciembre de 2012 se presentó 3.292% de meses muy secos, 10.266% de meses secos, 67.555% de meses normales, 17.633% de meses húmedos y 1.254% de meses muy húmedos. Debe aclararse que estos porcentajes ya

ISSN 2007-2422

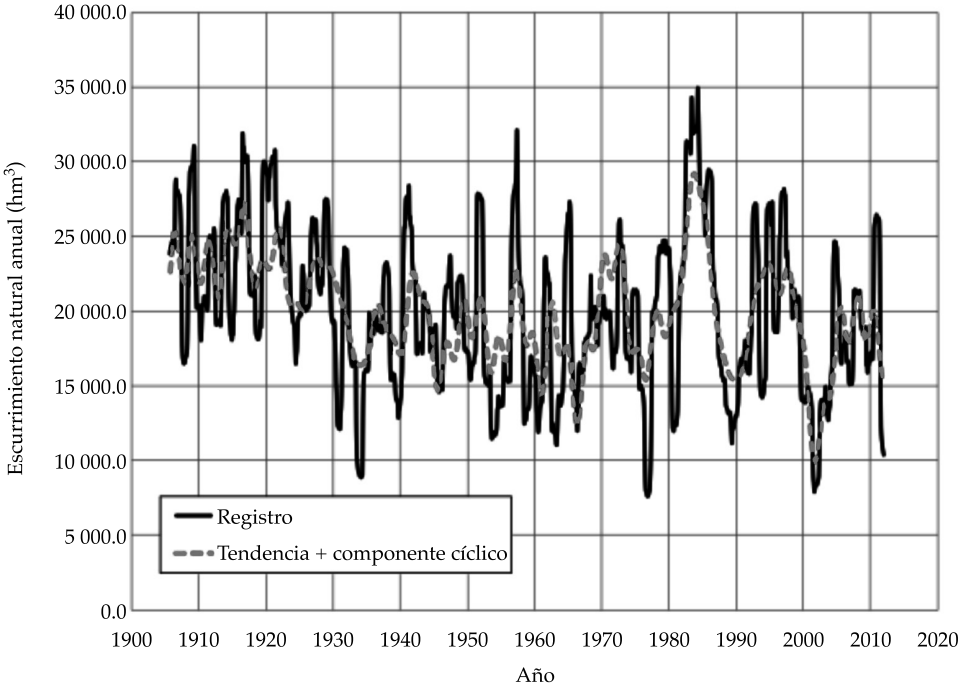


Figura 23. Comparación entre el registro mensual de escurrimiento anual en el río Colorado y la suma de su tendencia y componente cíclico.

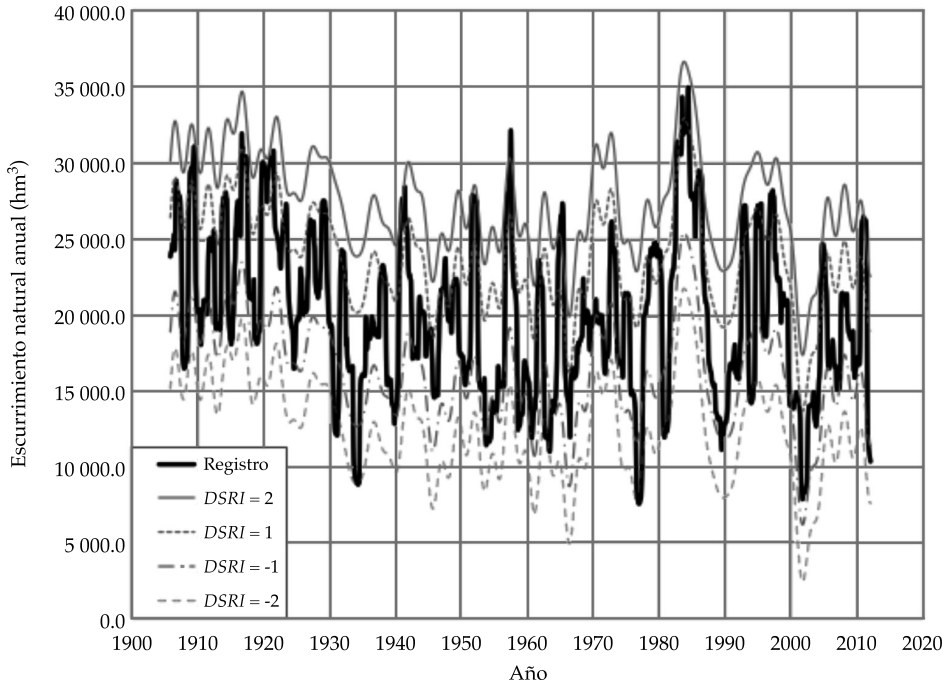


Figura 24. Clasificación de escurrimientos naturales anuales en la cuenca del río Colorado.

• ISSN 2007-2422

incluyen el efecto de la tendencia. Los periodos muy secos se presentaron de agosto de 1931 a febrero de 1932, marzo de 1935, mayo de 1935, de julio a diciembre de 1963, de julio de 1977 a abril de 1978, de julio de 1981 a marzo de 1982, y de agosto de 1994 a febrero de 1995.

El método propuesto en este trabajo, basado en el *DSRI*, constituye un sistema de clasificación objetivo del régimen de escurrimiento natural en un río y es consistente con la distribución normal de probabilidad, incorporando asimismo el concepto de normalidad variable, que reconoce que el clima y sus efectos exhiben comportamiento periódico y variaciones a largo plazo. Por otra parte, la metodología de análisis desarrollada en este capítulo reconoce que en el registro de escurrimientos naturales pueden estar involucrados componentes *no aleatorios*, lo cual implicaría que los mismos no sean independientes, hecho que explica el porqué si los valores de los escurrimientos no se descomponen en componentes deterministas y componentes aleatorias no se satisfaga la normalidad distribucional, en vista de que entonces se viola una de las hipótesis fundamentales del teorema del límite central, que es la de independencia estadística de los valores muestrales.

Comparación de los criterios estático y dinámico para la clasificación de sequía

Resulta interesante comparar el criterio estático, basado en percentiles, y el criterio dinámico, sustentado en la descomposición tripartita, que han sido presentados en las secciones anteriores para caracterizar el régimen mensual de escurrimiento natural anual. Dicha comparación se presenta en el cuadro 6. Puede observarse que el criterio del *DSRI* implica que los meses muy secos son un poco más frecuentes; los secos, un poco más infrecuentes; los normales, de frecuencia similar; los húmedos, un poco más frecuentes, y los muy húmedos son un poco más infrecuentes. Esto se debe en particular a la influencia de la tendencia y componente cíclico, que caracterizan la dinámica propia de la variabilidad del escurrimiento natural anual en la cuenca del río Colorado.

Por la importancia que tienen en el manejo sustentable del agua en la región bajo estudio, resultan de particular interés los periodos escasos y extraordinariamente escasos. En la figura 25 se muestra una comparación de los criterios basados en percentiles y el *DSRI* para determinar la ocurrencia de dichos periodos.

Conclusiones

El Tratado sobre Distribución de las Aguas Internacionales celebrado entre México y Estados Unidos en 1944 establece la obligación que tiene el segundo país de asignar al primero un volumen anual de 1 850.234 hm^3 de las aguas del río Colorado. Asimismo, implica que cuando ocurra una extraordinaria sequía en la parte de la cuenca ubicada en los Estados Unidos, que haga difícil a éstos entregar dicha cantidad a México, el volumen entregado se reducirá en la misma proporción en que disminuyan los consumos en los Estados Unidos. Desafortunadamente, el Tratado no contiene una definición de "sequía extraordinaria". Los gobiernos de México y Estados Unidos, en el seno de la CILA han iniciado una colaboración para caracterizar el régimen de escurrimiento en el río. El autor de este artículo ha asesorado técnicamente a la

Cuadro 6. Comparación de criterios para la clasificación del régimen mensual de escurrimiento anual en la cuenca del río Colorado.

Criterio	% de meses muy secos	% de meses secos	% de meses normales	% de meses húmedos	% de meses muy húmedos
Percentiles	2.351	13.558	68.182	13.558	2.351
DSRI	3.292	10.266	67.555	17.633	1.254

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 167-195
ISSN 2007-2422

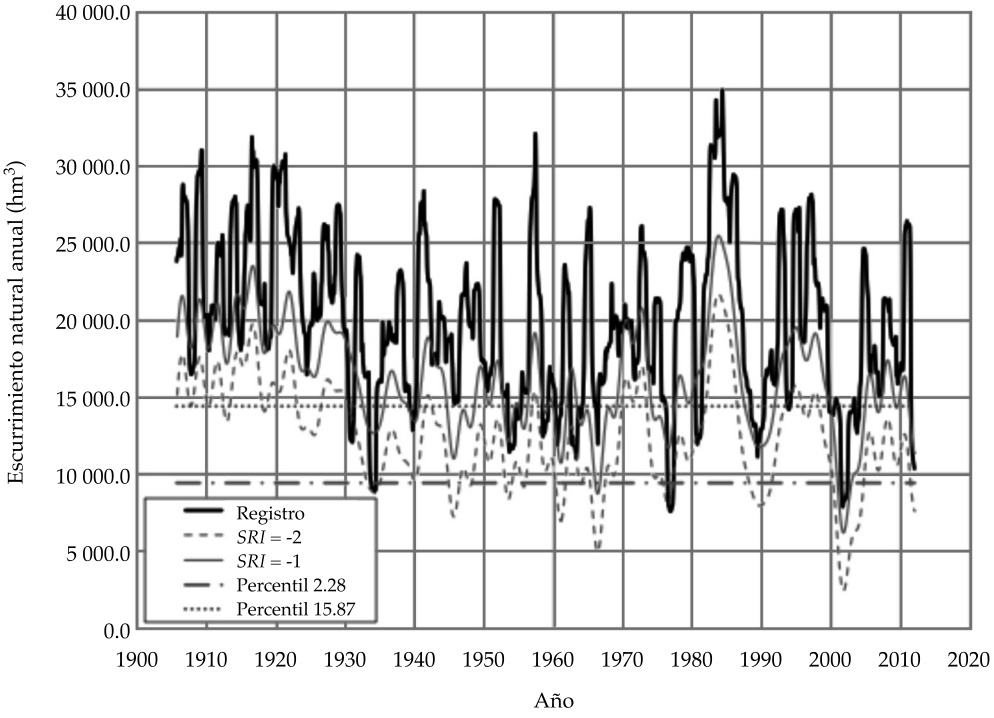


Figura 25. Comparación de criterios para la caracterización de periodos secos y muy secos.

Conagua y a la Sección Mexicana de la CILA en dicha materia. En vista de que el Tratado habla de volúmenes anuales, se ha abordado la caracterización del régimen de escurrimientos *naturales* anuales, a fin de eliminar los efectos propios de la operación de infraestructura hidráulica. En este trabajo se presenta un análisis estadístico detallado de dicho régimen. En particular, se demuestra que los datos crudos del régimen mensual de escurrimiento natural anual no siguen una distribución normal, resultado que llama la atención en vista de que el teorema del límite central predice que una variable aleatoria, definida como la suma de un número significativo de otras variables aleatorias, tiende asintóticamente a distribuirse de forma normal. También se presenta el análisis espectral de los datos y se identifican periodos dominantes de oscilación del orden de 60 años, que representan ciclos superdecenales, entre 7 y 13 años, que representan ciclos decenales; y de 2 a 5 años, que significan ciclos subdecenales.

También se propone un criterio estático de clasificación del régimen de escurrimiento, basado en percentiles. La propuesta más significativa de este trabajo consiste en presentar el desarrollo de una nueva metodología para clasificar regímenes de escurrimiento en general y sequías en particular. Dicha metodología se basa en la descomposición tripartita del escurrimiento natural anual en una componente tendencial, una componente cíclica y una componente aleatoria. Se presenta el procedimiento para determinar el componente cíclico en términos de un periodograma condicional, basado en la determinación de los principales modos de Fourier, sujeto a que el componente aleatorio posea una distribución normal. Asimismo, se explica la razón por la cual los escurrimientos crudos no siguen dicha distribución, pues contienen componentes que no son estadísticamente independientes, condición *sine qua non* para la aplicación del teorema del límite central. Se propone, asimismo, el índice dinámico estanda-

rizado de escurrimiento (*DSRI*, por sus siglas en inglés), que provee un medio objetivo, riguroso y racional para clasificar escurrimientos, en tanto que está basado en el teorema del límite central e incorpora los efectos dinámicos tendenciales y cíclicos de un registro hidrológico. El uso combinado y juicioso del *DSRI* y del criterio estático basado en percentiles puede contribuir a la gestión sustentable del agua transfronteriza en la cuenca del río Colorado, permitiendo en especial hacer previsiones para los periodos secos y muy secos.

Agradecimientos

El presente artículo contiene una parte de los resultados obtenidos a través de la consultoría que el autor realizó en 2015 para apoyar la implementación del Proyecto de Fortalecimiento del Manejo Integrado del Agua en México, bajo el Acuerdo de Cooperación Técnica entre la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de los Estados Unidos Mexicanos y la Organización Meteorológica Mundial, para Promover, Impulsar y Fortalecer la Gestión Integrada y Sostenible de los Recursos Hídricos en México (firmado el 2 de septiembre de 2005). Al respecto, se agradece el patrocinio y estrecha colaboración de la Conagua y de la Organización Meteorológica Mundial. También se reconoce la colaboración de las secciones mexicana y estadounidense de la CILA, así como del USBR.

Referencias

Aldama, A. (2010). Asistencia Técnica Especializada para el Análisis del Régimen de Escurrimiento de las Aguas Superficiales del Río Colorado, Organización Meteorológica Mundial-Comisión Nacional del Agua, México.

Aldama, A. (2011). Asistencia Técnica Especializada para la Propuesta de la Postura del Gobierno Mexicano en cuanto a la Definición del Término "Extraordinaria Sequía" en el Marco del Tratado Internacional de 1944, Informe PREMIA/OMM No. 160, estudio realizado para la Comisión Nacional del Agua y la Organización Meteorológica Mundial, México.

Aldama, A. (2013). Asistencia técnica especializada para definir las acciones para dar cumplimiento a lo establecido en el Acta 319 de la CILA en materia de hidrología, y apoyo en la presentación del análisis del régimen de escurrimiento de las aguas superficiales del río Colorado (1ª Etapa), Informe OMM/PREMIA No. OMM/PREMIA No. 230, México.

Audi, R. (ed.) (1999). *The Cambridge Dictionary of Philosophy*, 2nd. ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK.

CILA (2012). Medidas Interinas de Cooperación Internacional en la Cuenca del Río Colorado hasta el 2017 y Ampliación de las Medidas de Cooperación del Acta 318, para Atender los Prolongados Efectos de los Sismos de Abril de 2010 en el Valle de Mexicali, Baja California, *Acta 319 del Tratado sobre Distribución de las Aguas Internacionales celebrado entre México y los Estados Unidos en 1944*.

Falk, M., Marohn, F., Michel, R., Hofmann, D., Macke, M., Tewes, B., & Dinges, P. (2006). *A First Course on Time Series Analysis*, *Chair of Statistics*. Würzburg: University of Würzburg.

Hogg, R., McKean, J., & Craig, A. (2012). *Introduction to Mathematical Statistics*. London: Pearson.

Meyer, P. (1973). *Probabilidad y aplicaciones estadísticas*. Bogotá: Fondo Educativo Interamericano.

Nalbantis, I., & Tsakiris, G. (2009). Assessment of Hydrological Drought Revisited, *Water Res. Management*, *23*, 881-897.

NIST/Sematech (2006). E-Handbook of Statistical Methods. Recovered from http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/.

OMM/UNESCO (2012). *Glosario Hidrológico Internacional*. Recuperado de http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/aglu.htm.

Stearns, S. (1975). *Digital Signal Analysis*. Rochelle Park, USA: Hayden Book Company, Inc.

West Chester University (2009). Recovered from http://courses.wcupa.edu/rbove/eco252/252suppkey.htm.

Dirección del autor

Dr. Álvaro A. Aldama

Paseo de Los Laureles 176
Fracc. Kloster Sumiya
62550 Jiutepec, Morelos, México
Teléfono: +52 (777) 1033 614
alvaro.aldama@gmail.com

Haga clic aquí para escribir al autor

Sequía en Durango, México.

Foto: Oscar Alonso Barrón.

El monitor de la sequía en México

• René Lobato-Sánchez* •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
*Autor para correspondencia

Resumen

Lobato-Sánchez, R. (septiembre-octubre, 2016). El monitor de la sequía en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *7*(5), 197-211.

Por su lenta evolución, la sequía es uno de los fenómenos naturales más costoso en cuanto a sus impactos. En 2002 se conformó un grupo de climatólogos de México, Estados Unidos y Canadá, para implementar el Monitor de Sequías para Norteamérica (NADM, por sus siglas en inglés). De esta iniciativa se adapta la metodología para elaborar el Monitor de Sequías de México (MSM). Las sequías se pueden clasificar por sus mecanismos físicos, por sus impactos o por una combinación de éstos; no existe una sola definición que integre todo el espectro a aplicaciones. La escala temporal y espacial de su evolución y magnitud requiere de los conceptos meteorológicos con información de lluvia y temperatura; agrícolas, con humedad de suelo y condiciones de salud de la vegetación; hidrológicos, en cuanto a condiciones de escurrimientos y embalses; y socioeconómicos, en la disponibilidad de bienes de consumo y dotación de agua a centros urbanos y hasta pequeñas comunidades. El MSM integra siete diferentes índices mediante un sistema de información geográfica; la experiencia del climatólogo con el consenso entre usuarios y especialistas la complementa. Además, se utiliza información histórica, enfatizando la calidad y oportunidad para un seguimiento objetivo y periódico, comparando con la actual en forma de índices y porcentajes con respecto a sus valores medios. El reto consiste en conjuntar toda esta información en un solo producto, con valores estandarizados que permitan determinar la magnitud de la sequía. El MSM es información básica para la atención de programas que tienen que ver con la gestión del agua.

Palabras clave: sequías, monitor, clima, precipitación, temperatura, humedad del suelo, evapotranspiración, índice.

Abstract

Lobato-Sánchez, R. (September-October, 2016). The Drought Monitor in Mexico. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 7(5), 197-211.*

Because of its slow evolution and its impacts, drought is among the costliest natural phenomena. In 2002 a group of climatologists from Mexico, Unites States and Canada implemented the North American Drought Monitor (NADM), under such initiative the methodology was adapted to develop the Mexican Drought Monitor (MSM). Droughts may be classified by its physical mechanisms, by its impacts or a combination of both; there is no a single definition for fulfilling its entire spectra of applications. Temporal and spatial scale of drought evolution and magnitud required of the meteorological concepts with information of both rainfall and temperature; in agriculture, soil moisture and vegetation conditions are required; in hydrology with reservoir and stream flow conditions; and socioeconomic impacts in the availability of goods and water supply to all users. The MSM is constructed by using 7 different indices in layers blended through a Geographic Information System, it is complemented though the expertise of the climatologist along with the discussion and consensus among users and specialists. Historical information is a complement with the current in the form of indices and percentages with respect to its mean values, quality and timely data is required for a continuing and objective process. The challenge resides in collecting all the information in one single product with standardized units which allow the determination of its magnitude. The MSM is the basic input information for programs dealing with water management.

***Keywords**: Droughts, monitor, climate, temperature, precipitation, soil moisture, evapotranspiration, index.*

Recibido: 18/08/2015
Aceptado: 04/02/2016

Introducción y objetivos

El contexto de la sequía, dependiendo de su extensión temporal y magnitud, tiene diversas implicaciones en algunos sectores preponderantes en la gestión del agua, como la agricultura. El inicio de este proceso se debe a la falta de la precipitación que de forma regular ocurre durante la temporada de lluvias y que se puede manifestar tanto en magnitud como duración. Sin embargo, la complejidad del fenómeno se debe a que si bien inicia como una falta de precipitación dentro de

los rangos medios de la región en donde aparezca, cuando esta falta de lluvia se prolonga, entonces se extiende manifestando sus impactos en los sectores agrícolas e hidrológicos en primer instancia y después afectando el entorno socioeconómico.

La sequía es un fenómeno complejo debido a su lento desenvolvimiento y sus impactos directos. Es común que las acciones de mitigación de sus impactos se implementen cuando se tiene el fenómeno en su máxima intensidad.

Por lo general, la forma de clasificar la evolución de la sequía es a través de cuatro etapas fundamentales: meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica. Cada una de ellas tiene un impacto y sus respectivas consecuencias (Wilhite & Glantz, 1985; American Meteorological Society, 1997). Encontrar una sola definición que considere el concepto de sequía es muy complejo debido a las necesidades de cada usuario; no existe una definición universal, pues está sujeta a las características de cada régimen climático y del impacto al sector específico (Wilhite, Svovoda, & Hayes, 2007). La que más se acerca al proceso de elaboración del MSM es una modificación a la presentada por Frick, Bode y Salas (1990): "Una sequía se define como un período sostenido de baja precipitación tal que el agua disponible de embalses, escurrimientos, acuíferos y fuentes externas no cumplen con las necesidades de los usuarios de la cuenca". Por otra parte, los impactos por sequías en la actualidad se vuelven muy complejos debido a que se pueden diversificar a otros sectores, como turismo, energía, transporte, salud, ecología y medio ambiente, entre otros (Wilhite *et al*., 2007), que en etapas de máxima intensidad alcanzan a tener consecuencias sociales importantes; migración es una de ellas.

Los impactos por sequías se manifiestan de forma directa en la reducción de cosechas, pastizales y producción forestal; aumento del peligro de incendios; reducción en los niveles de embalses, ríos y acuíferos; incremento en la tasa de mortalidad de ganado y vida silvestre; daño a pesquerías y medio ambiente. Pero en la medida de su intensificación, la baja en cultivos, pastizales y producción forestal puede resultar en una merma del ingreso de agricultores y agronegocios, desempleo, incremento del crimen, ejecución de hipotecas de préstamos hipotecarios, migración y programas de atención de desastres. Las pérdidas asociadas con impactos indirectos a menudo exceden a los provocados por impactos directos (Wilhite *et al*., 2007).

El monitoreo de la sequía se ha convertido en parte integral de la planeación, preparación y mitigación a escalas local, regional e incluso nacional. Las sequías más recientes en México, desde que se implementó el MSM en 2003, describen que en forma relativamente frecuente, en alguna región del país se enfrenta un periodo de sequía; si bien, en general, las sequías aparecen con mayor frecuencia en las zonas áridas a semidesérticas, no están exentas de este fenómeno regiones semitropicales, como en el sur y sureste de México. Sólo considerando costos asociados con pérdidas en el sector agrícola, definidos por los Programas para Atender Contingencias Climatológicas (PACC), manejados por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa) e implementados por el Fondo de Desastres Naturales (Fonden), de acuerdo con los datos obtenidos de los reportes de evaluación del impacto socioeconómico de los principales desastres naturales ocurridos en la república mexicana de los años 2001 a 2012 del Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred), se estima que la sequía ocurrida en 2011, con base en los registros del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), fue una de las más intensas de los últimos 70 años y tuvo un costo de 7 750 millones de pesos (MDP) (figura 1). Otros impactos relacionados se refieren a la distribución del agua para consumo humano, donde las zonas urbanas, como la Ciudad de México y su zona conurbada, requieren de recortes en la dotación para cubrir los meses de mayor demanda.

El MSM no es un sistema de pronóstico. Su objetivo principal es describir la evolución de las sequías en magnitud y extensión espacial, en conjunto con sus impactos, principalmente en los sectores agropecuario e hídrico. Permite además evaluar las condiciones actuales y un poco en el pasado (retrospectiva), considerando

• ISSN 2007-2422

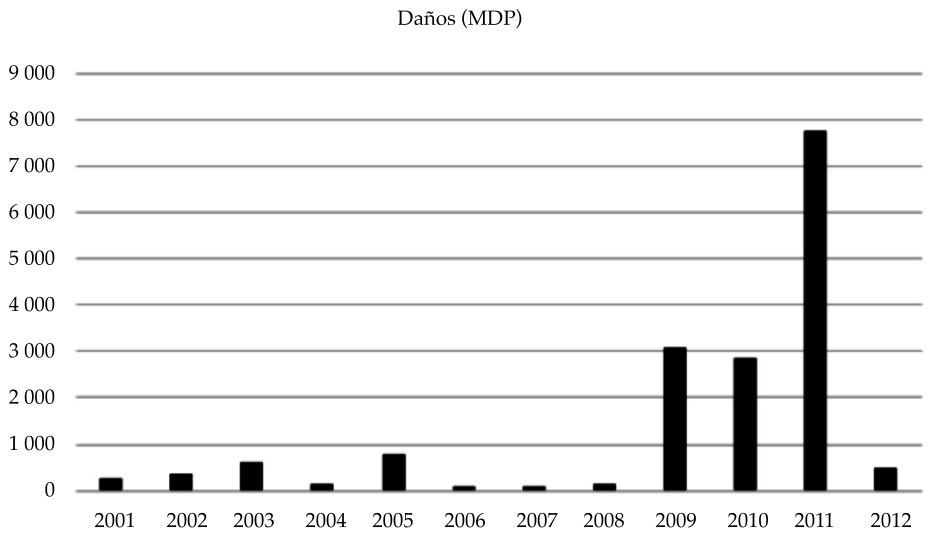


Figura 1. Relación de costos por sequía, considerando sólo los impactos en el sector agropecuario.

escalas lo más entendibles y accesibles para todo tipo de usuarios, desde expertos y tomadores de decisiones hasta usuarios y público en general, y medios de comunicación.

El MSM es una extensión del trabajo que se realiza en Norteamérica. A partir de 2002, México se incorporó al trabajo regional que se venía desarrollando tanto en Estados Unidos como en Canadá. Expertos en sequías de México, Estados Unidos y Canadá se reunieron por primera ocasión en un esfuerzo por mejorar el monitoreo y la evaluación de los extremos climáticos en el Centro Nacional de Datos Climáticos de la NOAA, en Carolina del Norte, EUA, para desarrollar el plan de un nuevo programa de monitoreo de sequía para Norteamérica (Lawrimore, Heim Jr., Svoboda, Swail, & Englehart, 2002). Producto de esta colaboración se implementa el Monitor de Sequías para Norteamérica (NADM, por sus siglas en inglés).

La metodología para su elaboración en México es similar a la de EUA y Canadá, solamente que algunos insumos se incorporan de forma manual y su análisis depende de la habilidad del climatólogo. Aunque al inicio se consideró como un producto experimental, a medida que el fenómeno de la sequía ha cobrado mayor relevancia, se utiliza ahora para fines de planeación, toma de decisiones y aplicación de programas para reducir la vulnerabilidad en la sociedad en general y su desarrollo.

Una forma muy clara del concepto del monitor de sequía lo describen Svoboda *et al*. (2002): "La determinación de la magnitud de la sequía a tiempo real puede ser tan complicada como su definición misma. No sólo la sequía es discutiblemente diferenciable de otros fenómenos naturales debido a sus diversos y muchos impactos, sino que también es medida por su extensión espacial, intensidad, magnitud y duración". El reto que se tiene en forma constante es que todas estas propiedades deben ser tomadas en cuenta en entender y reflejar el fenómeno mismo de la sequía y sus impactos en un solo mapa.

El problema viene de la subjetividad con la que se elabora el MSM, pues incorporar información con diferentes escalas y unidades, por ejemplo, la combinación de índices, como el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés), Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDI, por sus siglas en inglés), con anomalías de precipitación y valores estadísticos de lluvia y temperaturas (estos últimos generalmente definidos en percentiles), llevan a crear un concepto subjetivo que es donde la

ISSN 2007-2422

experiencia del climatólogo experto en sequías permite conjuntar en un solo producto. El MSM consiste de un mapa que describe las regiones del país que experimentan alguna condición de sequía y se acompaña por una narrativa donde se describen fundamentalmente sus impactos. El cuadro 1 describe las categorías de las magnitudes de las sequías empleadas en el MSM, donde cada categoría está asociada con la probabilidad de ocurrencia del percentil para un periodo de retorno de 100 años.

Aunque la condición D0 no es propiamente una condición de sequía, se considera debido a que por lo general antecede a la aparición formal o bien impactos prolongados posteriores a la sequía.

A diferencia de Estados Unidos, donde la elaboración del Monitor de Sequías se realiza en forma rotatoria por instituciones como NDMC, USDA, CPC y NCDC (Svoboda *et al*., 2002), el Monitor de Sequías se elabora en México sólo por el SMN y se publica de manera quincenal (http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=20&Itemid=74).

Una forma común de evaluar una sequía es a través del uso del SPI y PDSI; sin embargo, estas medidas solamente atienden el concepto de sequía meteorológica (precipitación) y agrícola (humedad de suelo y evapotranspiración), respectivamente.

Metodología

Similar al NADM, el MSM está compuesto de una serie de diferentes indicadores, modelos y datos en diversas unidades con escalas espaciales y temporales, la única diferencia radica en que no se emplea el sistema objetivo de combinación de indicadores OBDI (Svoboda *et al*., 2002), en su lugar procede una combinación subjetiva que depende en mayor medida de la experiencia del climatólogo y de la información con la que cuenta. A continuación se describe el procedimiento de elaboración del MSM.

El insumo más importante es la precipitación, por ello se pone especial atención a la red de estaciones que cuente con datos que contengan el nivel de confiabilidad, calidad y periodicidad aceptable de acuerdo con las normas establecidas por la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Se trata de un grupo selecto de estaciones climáticas con la calidad requerida y que en la actualidad cuenta con 358 sitios, con una distribución no uniforme dentro del país. La figura 2 describe la ubicación de las estaciones que conforman esta red, donde se aprecian regiones con suficiente cobertura espacial, así como otras donde es necesario reforzar la medición. Dentro de la escala climática, se emplea el concepto de anomalía, que se refiere al valor observado, comparado con su valor normal, referido para el caso del MSM en una escala porcentual (figura 3); el mapa de los últimos 30 días es importante, pues de éste se observa la ocurrencia de la precipitación, comparada con su valor de referencia (normal) y sirve para observar el régimen pluvial en función de un umbral de referencia (normal climatológica) en esta escala temporal, siguiendo a éste los mapas de 90, 180 y 365 días, que sirven también para observar el régimen pluvial a mediano y largo plazos, para determinar impactos principalmente en el sector hídrico y agrícola.

Cuadro 1. Clasificación de la sequía de acuerdo con sus condiciones y probabilidades.

Categoría	Condición de sequía	Probabilidad en percentil
D0	Anormalmente seco	20 a ≤ 30
D1	Sequía moderada	10 a ≤ 20
D2	Sequía severa	5 a ≤ 10
D3	Sequía extrema	2 a ≤ 5
D4	Sequía excepcional	≤ 2

• ISSN 2007-2422

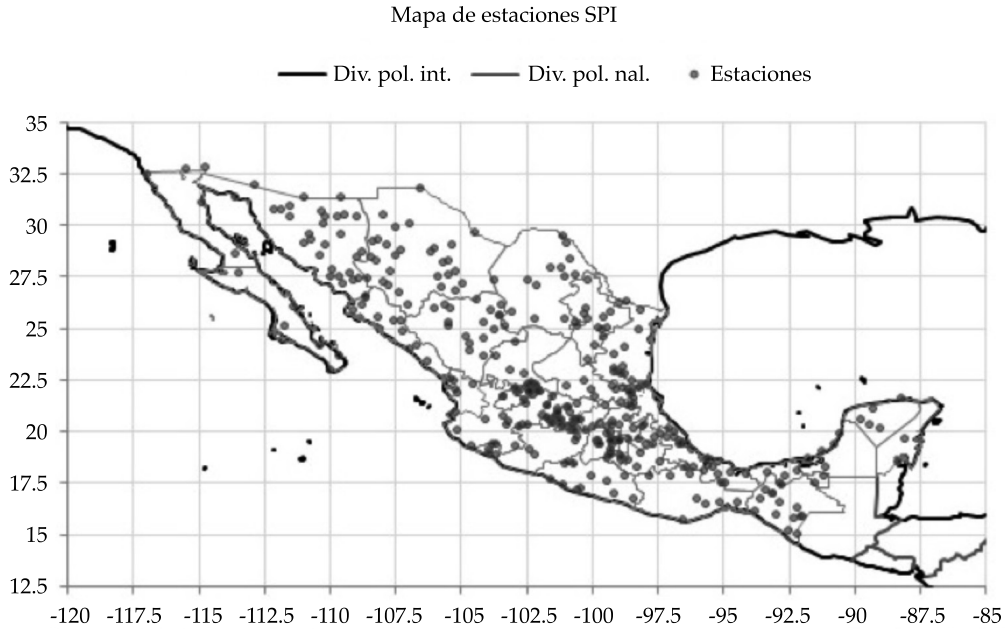


Figura 2. Red climática para elaboración del SPI.

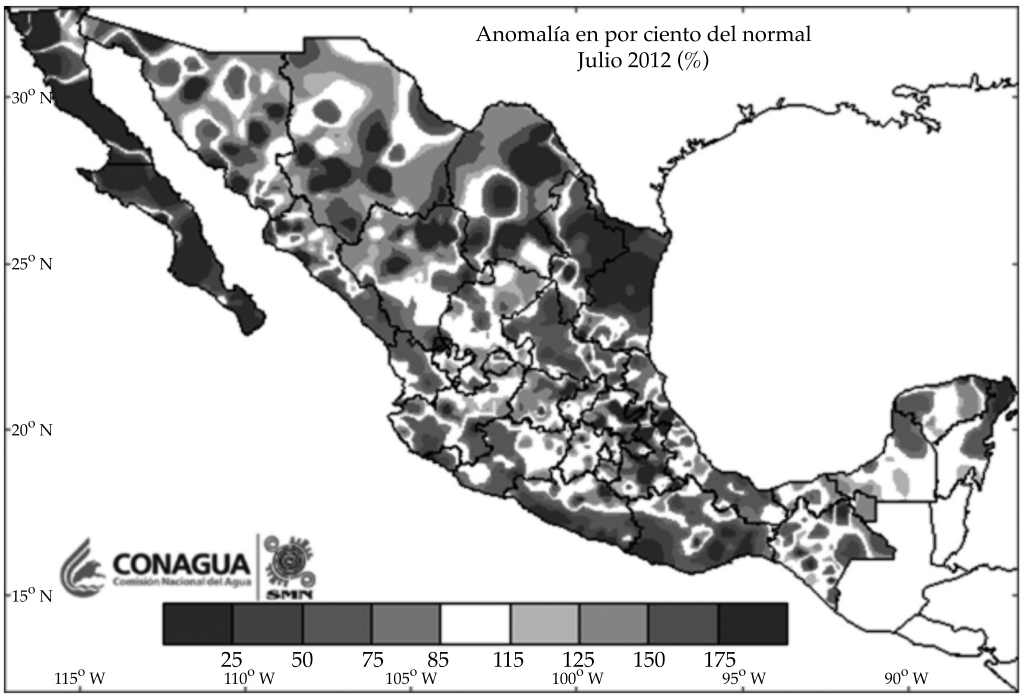


Figura 3. Ejemplo de mapa en porcentaje de precipitación.

ISSN 2007-2422 • *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 197-211

Los datos de precipitación sirven para elaborar los mapas del SPI, un valor muy recurrido para estimar condiciones de sequía. En diversos esquemas de seguimiento de sequías, éste se ha considerado como el insumo principal para implementar sistemas de alerta temprana por sequías, incluso se ha utilizado como un elemento de pronóstico, extendiendo el SPI a partir del pronóstico climático. Dentro de las cuatro fases en las que regularmente se enmarca la sequía, el SPI muestra las condiciones de la precipitación, por lo que es utilizado para monitorear sequías meteorológicas; ésta es una de las razones por la que se han hecho propuestas de otros indicadores, considerándolos en forma única o aislada hasta combinados (Heim Jr., 2002; Hao & Aghakouchak, 2014).

El SPI es una herramienta de uso común para el monitoreo de la sequía. Un ejemplo es el presentado por McRoberts y Nielsen-Gammon (2012), donde utiliza el SPI expresado a una alta resolución espacial para el monitoreo y evaluación de la sequía. La funcionalidad radica en la estandarización de la información pluviométrica, aunque es posible aplicar el mismo método con otras variables (p. ej., humedad de suelo y escurrimientos, entre otros) o incluso de manera combinada (Hao & Aghakouchak, 2013). El método se refiere a considerar un valor que representa el número de desviaciones estándar de la precipitación ocurrida a lo largo del periodo de acumulación de que se trate (1, 3, 6, 9, 12 o más meses) respecto de la media, una vez que la distribución original de la precipitación ha sido transformada a una distribución normal (Mckee, Doesken, & Kleist, 1993). EL SPI ha sido definido por la OMM como la herramienta estándar para el monitoreo de la sequía.

La forma en cómo se elabora el SPI es tomando como base datos climáticos mensuales, lluvia acumulada mensual en este caso, y se prepara para un periodo deseado de *m* meses, idealmente con un periodo continuo de cuando menos 30 años. Se elige un subgrupo de valores promedio para determinar las escalas temporales en periodos de *i* meses, donde *i* es 1, 2, 6, 12, 24 o hasta 48 meses. El grupo de datos se desplaza en el sentido de que cada mes un nuevo valor es determinado de los meses *i* previos. Cada uno de estos datos se ajusta a una función gamma para definir su probabilidad de precipitación. Una vez que la relación de probabilidad de precipitación se establece de los registros históricos, la probabilidad de cualquier dato de precipitación es calculado y utilizado junto con una estimación de la normal inversa para calcular la desviación de la precipitación para una densidad de probabilidad distribuida con valor de media cero y desviación estándar de uno. Este valor es el SPI para un punto particular de lluvia. La figura 4 muestra un mapa del SPI, cuyas unidades coinciden con la definición acordada para el MSM y NADM.

La temperatura a nivel nacional es la segunda variable observada, que de la misma forma que la precipitación, se maneja en términos de umbrales, considerando los valores de temperatura máxima, mínima y media, y sus correspondientes anomalías. Valores altos de temperatura conducen a un estrés hídrico e impacta de forma directa en la vegetación y condición de humedad de suelo. La figura 5 muestra a manera de ejemplo la distribución espacial de la anomalía de la temperatura media.

En uno de los primeros esfuerzos por contar con una herramienta que permitiera estimar la magnitud de las sequías que impactan en la agricultura, se desarrolló el índice de Palmer. En general, se refiere a los tres índices que regularmente se conocen: índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI/PDI, por sus siglas en inglés); índice de sequía hidrológica de Palmer (PHDI), y el índice Z (Robeson, 2008). Se utiliza para estimar la duración e intensidad de las sequías de largo periodo. Su naturaleza cumulativa permite conocer las condiciones prevalecientes de las sequías más aquellos de los meses previos. Para su cálculo se requiere de series de tiempo largas de cinco parámetros: precipitación; evapotranspiración; pérdida y recarga de humedad de suelo (incluyendo el contenido de agua en la planta), y escorrentía. La disponibilidad de toda esta información en el trabajo diario hace complicado su cálculo; por

• ISSN 2007-2422

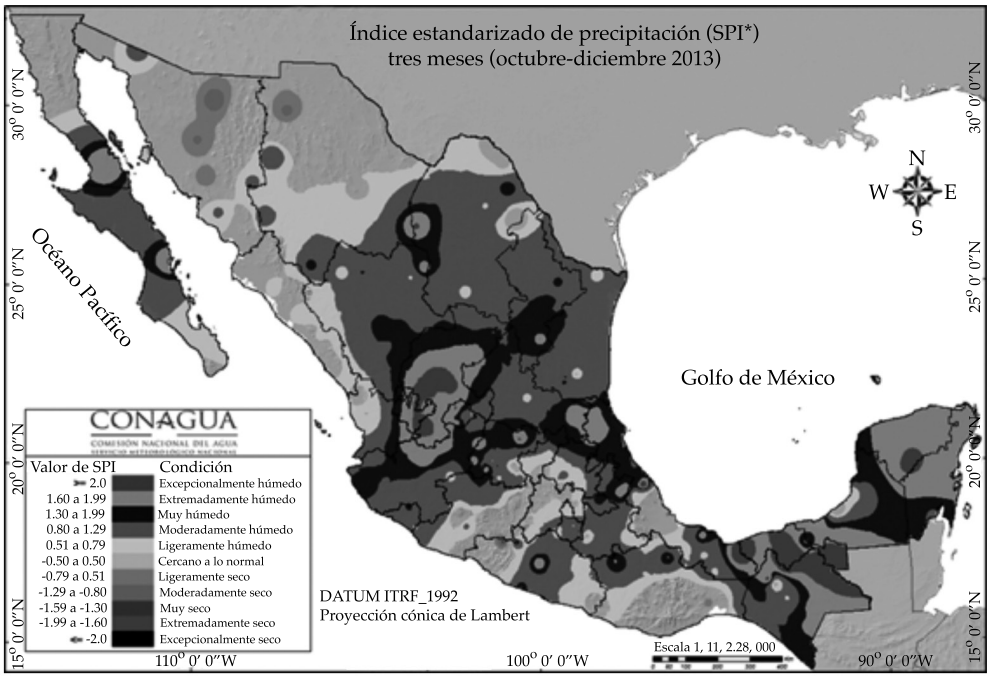


Figura 4. Ejemplo de mapa de índice estandarizado de precipitación a tres meses. Se emplea en particular para la detección y seguimiento de las sequías meteorológicas.

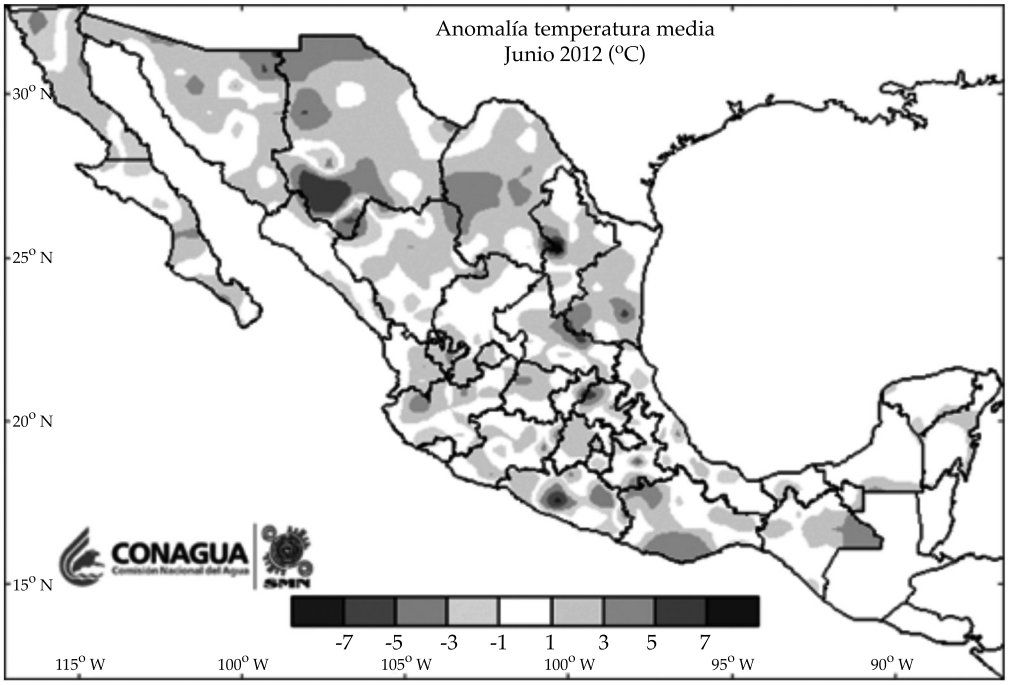


Figura 5. Ejemplo de mapa de anomalías de temperatura media para el mes de junio de 2012.

lo regular se estiman de manera indirecta las condiciones de evapotranspiración y humedad del suelo.

El cálculo del índice de sequía de Palmer se puede resumir como sigue: se obtienen los valores históricos, actuales y esperados de los primeros cuatro parámetros, preferentemente en escalas mensuales; se calculan los coeficientes dividiendo las cantidades medias observadas contra las esperadas; con estos coeficientes y las series de tiempo se determina la cantidad de humedad "normal" de cada mes mediante la ecuación de balance hídrico, considerando que la precipitación es función del escurrimiento, flujo que rebasa la zona de la raíz de la planta, evapotranspiración, contenido de agua en la planta y suelo; y se calcula la desviación de la precipitación actual contra la precipitación considerada como "condiciones existentes climatológicamente apropiadas", convirtiendo estas desviaciones a índices de anomalía de humedad, mejor conocido como el índice Z de Palmer (Weber & Nkemdirim, 1998).

La forma recursiva del cálculo del índice de Palmer limita su uso para el seguimiento a tiempo real, pues es complicado saber los inicios de los periodos húmedos o secos con anticipación. Una adaptación considera la incorporación del factor de probabilidad; así, el PDSI (figura 6) se calcula mediante la suma de los periodos secos y húmedos posteriores a su ponderación por sus probabilidades (Weber & Nkemdirim, 1998; Robeson, 2008), expresando el inicio y fin de una sequía (o periodos húmedos), en términos de la probabilidad de que este periodo inicie o concluya.

El monitoreo satelital permite, bajo ciertas condiciones, observar la superficie terrestre y los procesos que ocurren en ésta. La vegetación responde rápidamente a las condiciones de humedad del suelo y temperatura; la observación por satélite permite observar tales cambios cubriendo grandes extensiones y a una resolución temporal muy corta. El índice de salud vegetal (VHI, por sus siglas en inglés) está compuesto por el índice de condición de vegetación (VCI, por sus siglas en inglés) y por el índice de condición de temperatura (TCI, por sus siglas en inglés), donde un coeficiente define la contribución de cada uno de éstos y se utiliza para el monitoreo de sequías, así como para determinar las condiciones de los cultivos en el corto plazo; Anderson *et al*. (2013) recomiendan una ponderación equivalente para TCI y VCI, suponiendo que la contribución de estos índices es la misma. Para fines prácticos, un valor del VHI por arriba de 60 indica condiciones favorables para la agricultura. Kogan (1997) describe esta aplicación global para la detección de sequías y su monitoreo mediante la combinación de VCI-TCI y que se resume en el VHI, cuya información se obtiene de los sensores AVHRR en los canales visible, infrarrojo cercano e infrarrojo, instalados en los satélites de órbita polar de la NOAA. A partir de 1980, la información obtenida por el VHI, y derivado de su calidad y temporalidad, se ha vuelto indispensable para el seguimiento de condiciones de vegetación a tiempo real y el impacto del clima. La figura 7 muestra el índice de salud de la vegetación para México, que puede ser obtenido de la siguiente liga: http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/index.php, así como una serie de tiempo (figura 8), con valores promedio para el estado de Sonora desde 1980 hasta la fecha. Esta serie de VHI se puede obtener para las demás entidades del país.

Con datos de poco más de 20 años de los sensores AVHRR instalados en los satélites de órbita polar de la NOAA, se ha podido establecer un umbral de condiciones normales de vegetación a partir de valores inferidos por emisiones de energía electromagnética en las bandas visible e infrarroja. El principio del cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) depende de la medición de los valores de la reflectancia emitida por sus componentes en la superficie terrestre y en especial por la cobertura vegetal, separándola de aquella que es absorbida. Esta información se utiliza para determinar condiciones específicas, comparando con valores estadísticos de largo plazo. La percepción remota satelital permite, entre otras cosas, cuantificar qué fracción de la

• ISSN 2007-2422

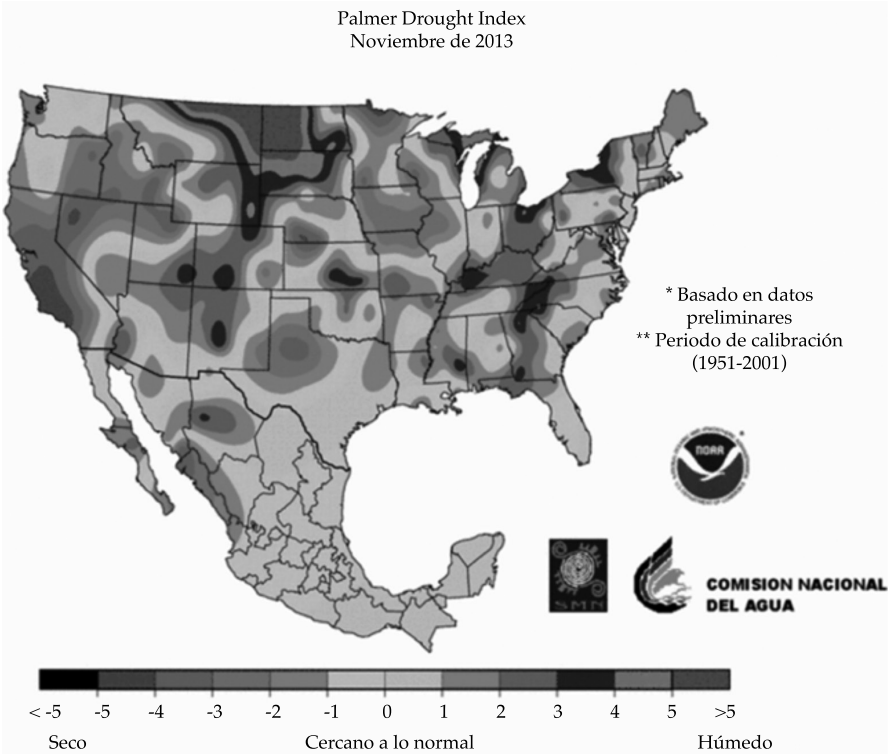


Figura 6. Mapa del índice de sequía de Palmer, producto elaborado en colaboración con el CPC de la NOAA a través del NADM.

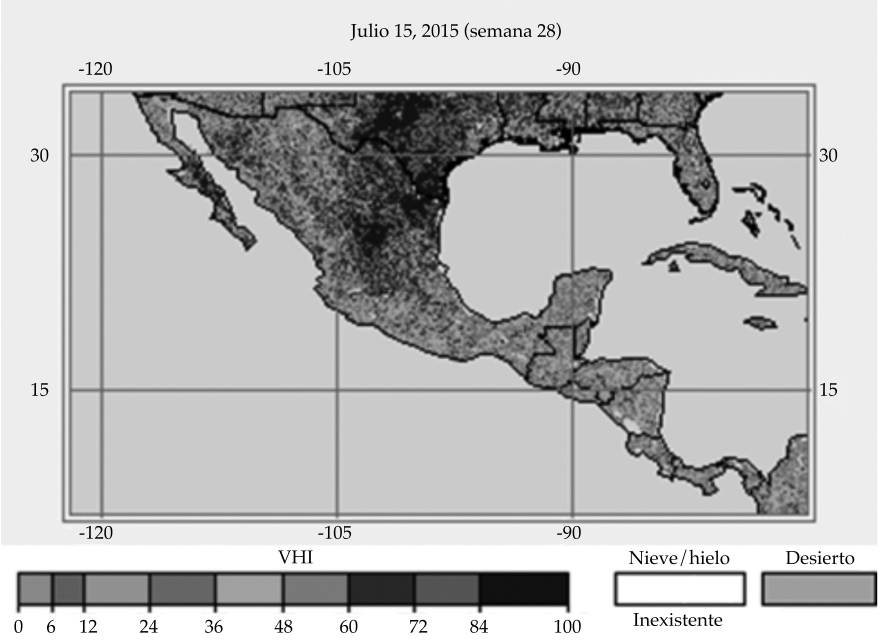


Figura 7. Ejemplo de mapa de índice de salud vegetal.

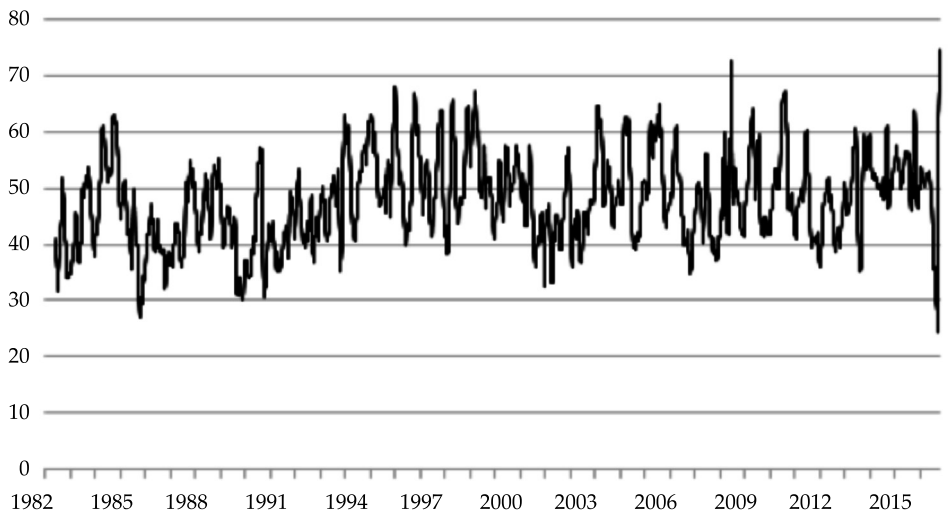


Figura 8. Condición del índice de salud vegetal para el estado de Sonora.

radiación fotosintéticamente activa es absorbida por la vegetación. De esta acción se puede determinar la condición de la vegetación, pues existe una relación directa entre la condición de la vegetación y su capacidad de absorción, y por lo tanto su productividad. Así, pueden utilizarse regiones de reflexión y absorción de radiación fotosintéticamente activa sobre un periodo de tiempo para caracterizar la salud de la vegetación en función de su valor normal. Una manera para cuantificar la condición de desarrollo de la vegetación es mediante la diferencia normalizada de la radiación infrarroja cercana y la radiación visible (figura 9). Su interpretación depende del valor del NDVI estimado. Por ejemplo, una vegetación que muestra una buena condición de desarrollo implica que contiene humedad de suelo aceptable y alta correlación en cuanto a densidad, por lo que sus valores serían los más altos; por otro lado, un suelo descubierto y con poca vegetación en condiciones de estrés muestra valores más bajos.

La condición antecedente de la humedad de suelo es un factor relevante que influye en las condiciones atmosféricas actuales y futuras; en interacción con la radiación solar determina la partición entre los flujos de calor latente y sensible, que son factores preponderantes en la formación de tormentas de tipo convectivo.

Una forma práctica de estimar las condiciones de humedad de suelo es mediante el uso de modelos. Un modelo conceptual utilizado en forma operativa es el Leaky Bucket (cubo filtrante), que determina las condiciones hidrológicas de humedad antecedente en la superficie. Su hipótesis se basa en que la humedad contenida en el suelo, hasta cierta profundidad, puede cambiar la partición de la radiación entrante entre los flujos de calor entrante y saliente, y así conocer las condiciones iniciales de la humedad del suelo, que pueden utilizarse como predictores útiles para la temperatura y precipitación en el corto plazo. La humedad del suelo se calcula mediante un balance de contenido de agua en el suelo, considerando como información de entrada a la precipitación, evaporación, escurrimiento superficial y pérdidas por flujo subterráneo, que por lo general ocurre en los primeros dos metros de la superficie terrestre. Éste fue el primer intento por construir una serie de tiempo larga (1931-1993) en los Estados Unidos de humedad de suelo con un modelo de una capa (Huang, Van den Dool, & Georgakakos, 1996). Aunque, en general, el modelo de contenido de humedad

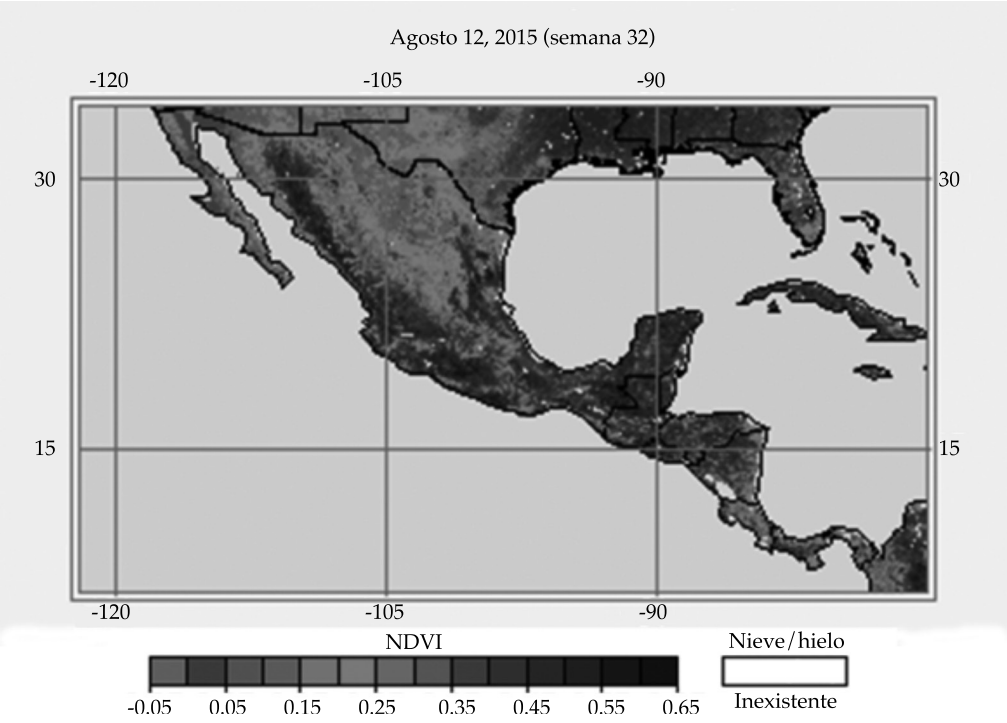


Figura 9. Ejemplo de mapa de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

de suelo se emplea como un predictor importante para temperatura y humedad, en este caso su uso es para determinar el contenido de la humedad del suelo sólo en los periodos en los que se elabora el MSM. La colaboración para la elaboración del NADM ha permitido extender este producto hasta México y es la información que se usa en la actualidad.

Por otra parte, México está elaborando su propia información histórica de humedad de suelo, considerando otro tipo de modelos hidrológicos que toman en cuenta procesos de interacción dinámica suelo-planta-atmósfera, como son los modelos NOAH y VIC (Liang, Lettenmaier, Wood, & Burges, 1994).

El modelo OSU-LSM mantiene una constante mejora en su esquema numérico a través de la colaboración institucional de NCAR, Oregon State University, Air Force e Hydrologic Research Laboratory; así es como conforman el acrónimo NOAH, siendo uno de los modelos más completos para representar la dinámica suelo-planta-atmósfera. El modelo simula humedad del suelo (líquido y sólido), temperatura del suelo, temperatura en superficie del suelo, capa de nieve, contenido de agua equivalente en nieve, contenido de agua en la cobertura vegetal, y flujos de agua y energía en términos de los balances de energía y agua en la superficie (Mitchell, 2005). La representación del ciclo completo la componen en el balance de agua en la superficie, la evaporación total integrada por la evaporación directa del suelo, evapotranspiración de la cobertura vegetal y evaporación del contenido de agua foliar, entre otros. La solución dinámica la integra la ecuación de Richards para el movimiento de agua y temperatura en el suelo, manteniendo el balance a través de la ecuación de continuidad. La figura 10 muestra un valor preliminar de la climatología para México de humedad de suelo para el mes de julio, estimada por el modelo NOAH a través del sistema GLDAS de la NOAA; hay un proceso de corrección utilizando información

disponible en redes de observación, como la que opera la Conagua/SMN en colaboración con la Comisión Nacional de Áreas Protegidas (Conamp).

Las condiciones hidrológicas definen la escala de mediano y largo plazos en el monitoreo de la sequía; la información sobre las condiciones de los escurrimientos (ríos) y embalses tanto naturales como artificiales (presas) definen su condición precedente. La Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR) de la Conagua constantemente vigila el estado que guardan las presas y escurrimientos del país, haciendo énfasis en el almacenamiento de las principales presas; maneja umbrales de almacenamiento que relacionan el impacto de severidad dependiendo de su porcentaje de llenado, definiendo así que en un almacenamiento entre 65 y 80% de llenado, la severidad se considera como mínima y tiene una reducción en la dotación de 10 a 15%; cuando el almacenamiento es de entre 40 y 65% del llenado, la severidad es moderada y la reducción en la dotación fluctúa de 15 a 25%; si el almacenamiento varía de 25 a 40% del llenado, la severidad se considera severa y la reducción en la dotación oscila entre 25 y 40%; finalmente, cuando el almacenamiento es menor a 25% de su llenado, la severidad se clasifica como crítica y se establece una reducción en la dotación mayor a 40%.

La elaboración final del MSM considera que los índices y variables se integren mediante un SIG. Después, por un consenso de expertos, se elabora el Monitor de Sequía para México, donde se determinan las regiones afectadas por sequía y su grado de impacto plasmado en un solo mapa (figura 11). Se incluye en forma tabular el impacto de la misma por municipio, información que se toma para la atención de programas federales y una narrativa o discusión, haciendo mención de los impactos y estadísticas en temperatura y precipitación que reflejan las condiciones imperantes del mes en curso.

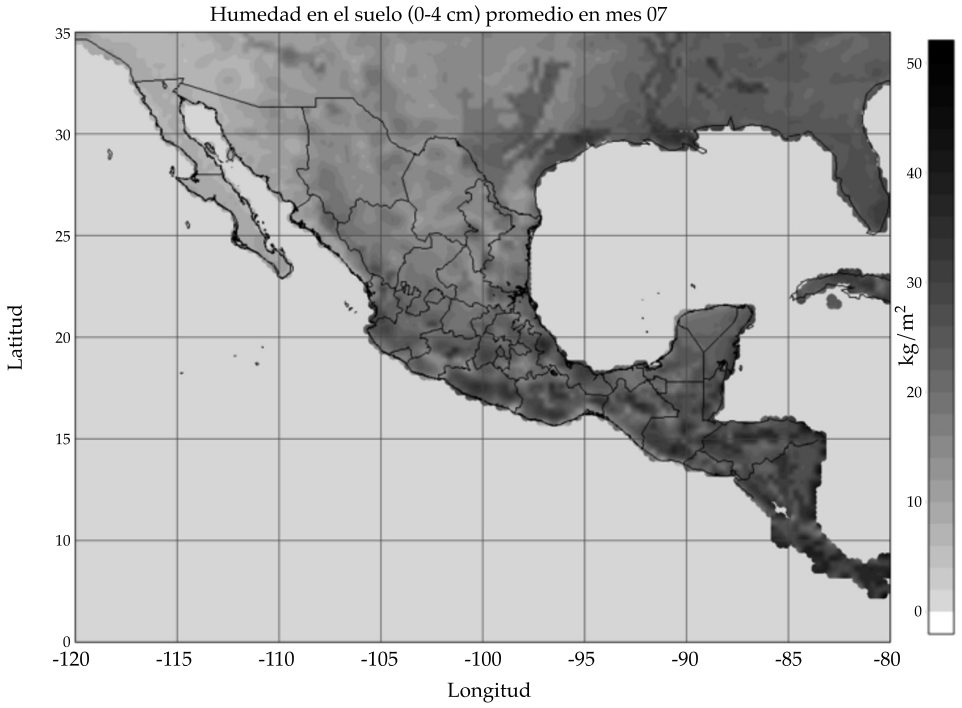


Figura 10. Media de humedad del suelo del mes de julio obtenido con el modelo NOAH a través del sistema GLDAS de la NOAA, unidades en kg/m².

• ISSN 2007-2422

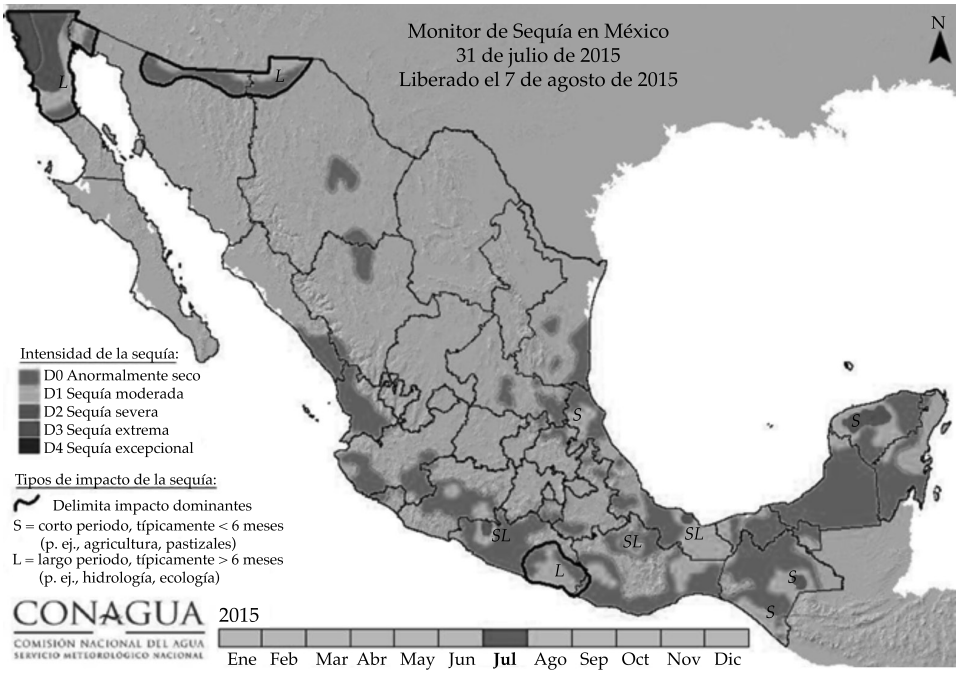


Figura 11. Mapa del Monitor de Sequía para México elaborado para el mes de julio de 2015.

Resultados y discusión

Se presenta la metodología actual sobre la elaboración del MSM. Se consolida una iniciativa con la que se atiende el impacto de uno de los fenómenos naturales que provoca mayores daños a la sociedad. El uso de esta información se extiende a prácticamente todos los sectores socioeconómicos, con lo que se permite atender a programas y grupos vulnerables, entre otros. Es información fundamental para la aplicación de una de las iniciativas más completas para reducir sus riesgos e impactos asociados con las sequías (Pronacose). Por su importancia, requiere de especial atención y resulta necesario mantener una constante mejora de las capacidades tanto en infraestructura de medición como en personal técnico especializado.

La cantidad de índices para cuantificar a la sequía son suficientes y de variado propósito. La mayoría de ellos son producidos en EUA. Los índices que se utilizan satisfacen los requerimientos en cuanto a calidad, oportunidad y elaboración del mismo. Sin embargo, es recomendable mejorar la generación de productos propios, como son los de humedad de suelo, índice de Palmer y vegetación, entre otros.

Dentro del funcionamiento del MSM es fundamental la calidad de la información de las redes de observación hidroclimáticas, porque de ahí depende el correcto despliegue de la información en el mapa. En virtud de la cantidad de estaciones climáticas utilizadas por el SMN, es necesario aumentar su número, sobre todo en regiones donde las sequías son recurrentes y la información climática es escasa. El apoyo al mantenimiento a estas redes es crítico para que el MSM tenga la calidad aceptable que se requiere para la toma de decisiones.

Conclusiones

La sequía es un fenómeno de lenta evolución, regularmente oculto en la variabilidad climática y en muchas ocasiones sólo se detecta cuando ya está presente, llegando a tener impactos

cuantiosos. Por ello es necesario mejorar los programas de monitoreo e implementar programas de prevención. Se requiere trabajar hacia la sistematización del MSM, y resulta necesario un sistema de consenso o ponderación para una evaluación objetiva, que permita su reproducción, así como un sistema en línea, donde los usuarios puedan retroalimentar a los climatólogos sobre los impactos de las sequías en todos los sectores socioeconómicos.

Con información hidrológica y climatológica confiable es posible avanzar hacia la perspectiva de la sequía, pues en la historia hay ocurrencia de fenómenos atmosféricos que conducen hacia la "persistencia", indicando así que los patrones pueden ser indicativos de lo que se puede esperar en el futuro y el rango en el que puede ser previsible. Por ello, es necesario un trabajo científico serio y formal que rescate la información climática histórica nacional, y determine la calidad y confiabilidad de la misma; esto permitirá mayor detalle regional y una mejora en la gestión integrada del agua.

Agradecimientos

Se agradece a la Conagua, en particular a la Subdirección General Técnica y a la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional por la información y colaboración prestada dentro del Pronacose y el Monitor de Sequías de México, así como a la maestra en ciencias Adelina Albanil y al ingeniero Reynaldo Pascual por las amplias discusiones técnicas sostenidas en innumerables ocasiones; también se agradece al maestro en ciencias Esteban Pardo, quien brindó todo su apoyo para el tratamiento de las figuras.

Referencias

Anderson, M. C., Hain, C., Otkin, J., Zhan, X., Mo, K., Svovoda, M., Wardlow, B., & Pimstein, A. (2013). An Intercomparision of Drought Indicators Based on Thermal Remote Sensing and NLDAS-2 Simulations with U.S. Drought Monitor Classifications. *Journal of Hydrometeorology (Advances in Drought Monitoring- Special Collection)*, *14*, 1035-1056.

American Meteorological Society (1997). Meteorological Drought – Policy Statement. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, *78*, 847-849.

Frick, D. M., Bode, D., & Salas, J. D. (June, 1990). Effect of Drought on Urban Water Supplies. I: Drought Analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, *116*(6), 733-753.

Hao, Z., & Aghakouchak, A. (2013). Multivariate Standardized Drought Index: A Parametric Multi-Index Model. *Advances in Water Resources*, *57*, 12-18.

Hao, Z., & Aghakouchak, A. (2014). A Nonparametric Multivariate Multi-Index Drought Monitoring Framework. *Journal of Hydrometeorology*, *15*, 89-101.

Huang, J., Van den Dool, H. M., & Georgakakos, K. (1996). Analysis of Model-Calculated Soil Moisture over the United States (1931-1993) and Applications to Long-Range Temperature Forecasts. *Journal of Climate*, *9*, 1350-1362.

Heim Jr., R. R. (2002). A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, *78*, 1149-1165.

Kogan, F. N. (1997). Global Drought Watch from Space. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, *78*(4), 621-636.

Lawrimore, J., Heim Jr., R. R., Svoboda, M., Swail, V., & Englehart, P. (August, 2002). Beginning a New Era of Drought Monitoring Across North America. Bulletin of The American Meteorological Society (BAMS), *83*, 1191-1192.

Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., & Burges, S. J. (1994). A Simple Hydrological based Model of Land Surface Water and Energy Fluxes for GSMs. *J. Geophys. Res.*, *99*(D7), 14415-14428.

McRoberts, D. B., & Nielsen-Gammon, J. W. (2012). The Use of High-Resolution Standardized Precipitation Index for Drought Monitoring and Assessment. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *51*, 68-83.

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). *The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales*. Eight Conference on Applied Climatology, January 17-22, Anaheim, California.

Mitchell, K. (2005). *The Community NOAH Land-Surface Model (LSM). User´s Guide*. Recovered from ftp://ftp.emc.ncep.noaa.gov/mmb/gcp/ldas/noahlsm/ver_2.7.1.

Robeson, S. M. (2008). Applied Climatology: Drought. *Progress in Physical Geography*, *32*(3), 303-309.

Svoboda, M., LeComte, D., Hayes, M., Heim, R., Gleason, K., Angel, J., Rippey, B., Tinkey, R., Palecki, M., Stooksbury, D., Miskus, D., & Stephens, S. (August, 2002). The Drought Monitor. *Bulletin of The American Meteorological Society (BAMS)*, *83*, 1181-1190.

Weber, L., & Nkemdririm, L. (1998). Palmer´s Drought Índex Revisited. *Geografiska Annaler*, *80A*(2), 153-172.

Wilhite, D., & Glantz, M. H. (1985). Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, 10(3), 111-120.

Wilhite, D., Svovoda, M. D., & Hayes, M. (2007). Understanding the Complex Impacts of Drought: A Key to Enhancing Drought Mitigation and Preparedness. *Water Resources Management*, *21*, 763-774.

Dirección institucional del autor

Dr. René Lobato-Sánchez

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Coordinación de Hidrología
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, México
Teléfono: +52 (777) 3293 600, extensión 858
rene_lobato@tlaloc.imta.mx

Haga clic aquí para escribir al autor

ISSN 2007-2422 • *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. VII, núm. 5, septiembre-octubre de 2016, pp. 197-211

Durante la sequía.

Foto: Oscar Alonso Barrón.

Discusión

Las notas o artículos técnicos se encuentran abiertos a discusión de acuerdo con los siguientes lineamientos:

- La discusión se escribirá en tercera persona.
- El redactor de la discusión deberá usar el término polemista cuando se refiera a él mismo y el término autor cuando se trate del responsable de la nota o artículo técnicos.
- La discusión deberá remitirse durante los doce meses posteriores al último día del trimestre en que se publicó el artículo o la nota técnicos.
- El periodo de discusión puede ser extendido mediante la solicitud por escrito del polemista.
- La discusión se presentará conforme a la *Guía para colaboradores* publicada en esta misma revista (se hará caso omiso de los datos referentes a la extensión, resumen y *abstract*). Además, contará con la cita bibliográfica de las notas o artículos técnicos aludidos.
- La extensión de la discusión ocupará como máximo cuatro páginas de la revista (aproximadamente diez cuartillas, incluyendo figuras y cuadros).
- Las figuras y los cuadros presentados por el polemista deberán marcarse progresivamente con números romanos y cuando se citen los realizados por el autor se habrá de respetar la numeración original.
- Los editores suprimirán los datos ajenos al objeto de la discusión.
- La discusión se rechazará si contiene temas tratados en otras fuentes, promueve intereses personales, está descuidadamente preparada, pone en controversia hechos ya establecidos, es puramente especulativa o es ajena a los propósitos de la revista.
- La discusión se publicará junto con los comentarios del autor o autores aludidos.
- La discusión se dirigirá al editor en jefe.

Atardecer en San Vicente, México.

Foto: José Luis Martínez Ruiz.

Guía para colaboradores

La revista ***Tecnología y Ciencias del Agua***, invita a los especialistas a colaborar con artículos o notas técnicas **inéditos, relacionados con el agua, derivados de una investigación, que brinden aportaciones originales** y se desarrollen dentro de la hidrología, hidráulica, gestión del agua, agua y energía, calidad del agua, ciencias físicas, biológicas y químicas, así como ciencias políticas y sociales, entre otras disciplinas, conforme a las normas que se enunciarán a continuación.

PREPARACIÓN DEL ARTÍCULO

FORMATO

Tipo de letra: Palatino en todo el documento (cuerpo del texto, cuadros e ilustraciones).

tamaño de letra: el documento se presentará en ocho, nueve, diez y veinte puntos de acuerdo con el siguiente cuadro:

8 puntos (Palatino)	9 puntos (Palatino)
• Cuadros. • Figuras. • Agradecimientos.	• Nombre de los autores. • Institución de los autores. • Resumen. • *Abstract* y *keywords*. • Dirección institucional de los autores.
10 puntos (Palatino)	**20 puntos versales (Palatino)**
• Cuerpo del texto. • Título del trabajo en inglés.	• Título del trabajo en español.

interlineado: doble espacio.

numeración de páginas: todas las páginas deben ir numeradas.

Extensión
***Artículo técnico*: treinta páginas** (numeradas), incluyendo figuras y cuadros.
***Nota técnica*: diez páginas** (numeradas), incluyendo figuras y cuadros.

CONTENIDO

Contenido
El artículo deberá presentar aportes significativos al conocimiento científico y tecnológico dentro de la especialidad; se basará en trabajos terminados o que hayan cumplido un ciclo en su desarrollo; mostrará resultados de una serie de experiencias de un año o más de investigación y estará respaldado por una revisión bibliográfica adecuada. **La estructura básica del texto deberá contener una introducción, el desarrollo y las conclusiones**. De preferencia, seguir el esquema clásico: resumen (abstract), introducción, metodología, resultados, discusión, conclusiones y referencias.

Título
El título, **redactado en español e inglés**, deberá ser informativo, sin que exceda de 12 palabras.

Resumen
El resumen, **redactado en español e inglés** (*abstract*), deberá ser conciso y proporcionar un amplio panorama de la investigación (objetivo, método, resultados y conclusiones), sin que sobrepase las 250 palabras.

Palabras clave
Se debe proporcionar una relación de ocho palabras o frases clave (máximo) redactadas **en español e inglés** (*keywords*), que faciliten la recuperación de la información.

Pies de página
No se admiten. Deberán incorporarse al texto.

Agradecimientos
Se incluirán después del texto y antes de las referencias.

Cuadros
- Deberá usarse una página para cada cuadro.
- Después de las referencias se presentará la lista de todos los cuadros que se citen.

Figuras
- Deberá usarse una página para cada figura.
- Todos los nombres de las figuras deberán incluirse después de los cuadros.
- Deberán tener alta resolución (300 dpi).

Nota: cuando el artículo se apruebe para publicación, el autor deberá remitir cada figura en archivo JPG, en alta resolución (300 dpi).

Referencias
- Toda la bibliografía debe estar referenciada en el cuerpo principal del documento.
- En el caso del abordaje de temas del dominio común en el ámbito científico y tecnológico, deberán citarse trabajos que denoten el conocimiento de los autores sobre el estado del arte.
- En la medida de lo posible, evitar las autocitas.
- Se tomará como base el formato APA de citación.

Algunos ejemplos con base en el formato APA:

Libros completos

Apellido, A. A. (Año). Título del trabajo. Ciudad de edición: Editorial.
Apellido, A. A. (Año). Título del trabajo. Recuperado de http://www.xxxxx
Apellido, A. A. (Año). Título del trabajo. doi:xxxxx
Apellido, A. A. (Ed.). (año). Ciudad de edición: Editorial.

Capítulos de libros

Apellido, A. A., & Apellido, B. B. (Año). Título del capítulo o entrada. En A. Apellido, B. Apellido & C. Apellido (Eds.), Título del libro (pp. xxx-xxx). Lugar: Editorial.
Apellido, A. A., & Apellido, B. B. (Año). Título del capítulo o entrada. En A. Editor & B. Editor (Eds.), Título del libro (pp. xxx-xxx). Recuperado de http://www.xxxxxxx

Artículo o nota de publicación periódica recuperado de la web

Apellido, A. A., & Apellido, B. B. (Año). Título del artículo. Título de la publicación, volumen(número), pp. Recuperado de http:// www.xxxxxxx

Esto es: Apellido, A. A., & Apellido, B. B. (Año). Título del artículo. Título de la publicación, 1(2), 5-17. Recuperado de http:// www.xxxxxxx

Artículo o nota de publicación periódica impresa

Apellido, A. A., & Apellido, B. B. (Año). Título del artículo. Título de la publicación, 8(1), 73-82.

Artículo de publicación periódica con DOI

Apellido, A. A., Apellido, B. B., & Apellido, C. C. (Año). Título del artículo. Título de la publicación, 8(1), 73-82, doi:xxxxxx

Congresos y simposia

Colaborador, A. A., Colaborador, B. B., Colaborador, C. C., & Colaborador, D. D. (Mes, año). Título de la colaboración. En E. E. Presidente (Presidencia), Título del simposio. Simposio llevado a cabo en la conferencia de Nombre de la Organización, Lugar.

Idioma

Español o inglés.

Separación de números y uso de punto decimal

En *Tecnología y Ciencias del Agua* se marcará la división entre millares con un espacio en blanco; mientras que para separar los números enteros de sus fracciones, cuando las haya, se usará el punto.

Al respecto, se retoma lo que indica el *Diccionario panhispánico de dudas*, editado por la Real Academia Española y la Asociación de Academias de la Lengua Española, en 2005, sobre las expresiones numéricas: "**se acepta el uso anglosajón del punto, normal en algunos países hispanoamericanos…: π = 3.1416.".**

Envío del artículo

Enviar el artículo en *Word* con nombre de autores y dirección institucional a **revista.tyca@gmail.com**, con copia a la licenciada Elizabeth Peña Montiel, elipena@tlaloc.imta.mx.

Información general

Una vez recibido el material, comenzará un proceso de revisión, durante el cual es posible que el manuscrito se rechace; si el texto es susceptible de ser dictaminado, pues cumple a cabalidad con la Política Editorial y así lo considera el Consejo Editorial, pasará a la etapa de arbitraje.

De acuerdo con el proceso de arbitraje, el texto puede ser aceptado sin cambios, con cambios menores, cambios mayores o ser rechazado.

Al ser publicado un trabajo, el autor principal tiene derecho, en forma gratuita a dos revistas y diez sobretiros.

En caso de cualquier duda, escribir a la licenciada Helena Rivas López, hrivas@tlaloc.imta.mx o a la licenciada Elizabeth Peña Montiel, elipena@tlaloc.imta.mx.

Citas dentro del cuerpo del texto

Tipo de cita	Primera cita en el texto	Citas subsecuentes en el texto	Formato entre paréntesis, primera cita en el texto	Formato entre paréntesis, citas subsecuentes en el texto
Un trabajo por un solo autor	Apellido (Año)	Apellido (Año)	(Apellido, año)	(Apellido, año)
Un trabajo por dos autores	Apellido y Apellido (Año)	Apellido y Apellido (Año)	(Apellido & Apellido, Año)	(Apellido & Apellido, Año)
Un trabajo por tres autores	Apellido, Apellido y Apellido (Año)	Apellido *et al*. (Año)	(Apellido, Apellido, & Apellido, año)	(Apellido del primer autor *et al*., año)
Un trabajo por cuatro autores	Apellido, Apellido, Apellido y Apellido (Año)	Apellido *et al*. (Año)	(Apellido, Apellido, Apellido, & Apellido, año)	(Apellido del primer autor *et al*., año)
Un trabajo por cinco autores	Apellido, Apellido, Apellido, Apellido y Apellido (Año)	Apellido *et al*. (Año)	(Apellido, Apellido, Apellido, Apellido, & Apellido , año)	(Apellido del primer autor *et al*., 2008)
Una obra por seis o más autores	Apellido del primer autor *et al*. (Año)	Apellido del primer autor *et al*. (Año)	(Apellido del primer autor *et al*., Año)	(Apellido del primer autor *et al*., año)
Grupos (identificados fácilmente a través de abreviaturas) como autores	Nombre completo de la institución (Siglas, año)	Siglas (Año)	(Nombre completo de la institución [siglas], año)	(Institución, año)
Grupos (sin abreviaturas) como autores	Nombre completo de la institución (año)	Nombre completo de la institución (año)	(Nombre completo de la institución, año)	

Política Editorial

Misión

Difundir el conocimiento y los avances científicos y tecnológicos en materia de agua, a través de la publicación de artículos y notas técnicas inéditas, que brinden aportaciones originales.

Nuestros principios

- Imparcialidad.
- Objetividad.
- Honestidad.

Nuestros valores

- Conocimiento.
- Experiencia.
- Autoridad temática.

Contenido

Interdisciplinario, conformado por aportaciones plasmadas en artículos y notas inéditos, relacionados con el agua, derivados de una investigación, que brinden aportaciones o innovaciones científicas y tecnológicas originales, que se desarrollen dentro del campo del conocimiento de diversas disciplinas.

Cobertura temática

Interdisciplinaria, relacionada con agua, con prioridad temática en los siguientes ámbitos del conocimiento:

- Agua y energía.
- Calidad del agua.
- Ciencias físicas, biológicas y químicas.
- Ciencias hidroagrícolas.
- Ciencias políticas y sociales.
- Desarrollo e innovación científica y tecnológica.
- Gestión del agua.
- Hidrología.
- Hidráulica.

Tipo de contribuciones

Artículo: documento científico que trata y comunica por primera vez los resultados de una investigación o innovación exitosa, cuyas contribuciones aportan e incrementan el conocimiento actual en materia hídrica.

Nota: texto inédito que trata avances principalmente en el campo de la ingeniería hidráulica y de la práctica profesional en materia de agua.

Algunos trabajos sometidos al proceso de arbitraje como artículo pueden terminar publicándose como notas o viceversa. Esto se hará bajo propuesta y un proceso de mutuo acuerdo entre los autores y el editor por tema responsable. Ambas contribuciones tienen prácticamente la misma estructura (resumen, introducción, metodología, resultados, discusión, conclusiones, referencias).

Proceso de arbitraje

La revista se rige por un riguroso proceso de arbitraje, el cual establece que cada trabajo debe ser analizado separadamente por tres revisores, quienes recomiendan su aceptación, su aceptación con cambios menores, su aceptación con cambios mayores, su rechazo o su aceptación como nota técnica con los cambios necesarios. Con base en estas recomendaciones, el editor temático responsable emite el dictamen final.

Se buscará que al menos uno de los revisores sea de alguna institución del extranjero.

Los revisores no podrán pertenecer a la misma institución de los autores que proponen el artículo o nota para publicación.

Cuando los dictámenes se contrapongan o resulten poco consistentes, el editor temático correspondiente podrá dictaminar, o solicitar la intervención de otros revisores o de algún miembro(s) del Consejo Editorial.

En los casos que lo amerite, el editor temático podrá decidir sobre la aprobación o no de un artículo o nota con el dictamen de dos revisores, más su propia opinión como editor por tema correspondiente, o la del editor en jefe.

Todo artículo o nota rechazado no se admitirá para un nuevo proceso de revisión.

El proceso de arbitraje se desarrollará bajo la modalidad de arbitraje "doble ciego", de tal manera que tanto los autores como los revisores no conozcan el nombre de su contraparte, a fin de mantener la imparcialidad del proceso.

Toda documentación asociada con el proceso de arbitraje se clasifica como confidencial; esto incluye nombre de los árbitros, dictámenes, para mantener la imparcialidad del proceso, y de los datos personales, a fin de cumplir con las leyes de la materia.

El proceso de arbitraje lo llevan a cabo especialistas y expertos de alto nivel, de reconocido prestigio nacional e internacional en su ámbito profesional, con la capacidad para evaluar, de manera confiable y expedita, tanto la calidad como las aportaciones originales como el grado de innovación científica y tecnológica del material que se somete a dictamen para posible publicación.

Esta participación se considera una contribución profesional, que es realizada de manera honorífica.

Para la elaboración de su dictamen, los árbitros cuentan con la "Guía para el revisor".

Dictamen final

El dictamen que se emita, derivado del proceso de arbitraje, es inapelable.

Autores

Se publican trabajos de autores de cualquier nacionalidad, que presenten sus contribuciones en español o inglés.

A fin de promover la diversidad de autores y su procedencia, un mismo autor o coautor no podrá publicar en la revista ***Tecnología y Ciencias del Agua*** más de dos trabajos al año, con excepción de artículos o notas publicadas en ediciones especiales y números extraordinarios.

Una vez que se acepta un artículo o nota para ser publicado, los autores firman un permiso para publicar, en donde ceden los derechos patrimoniales en exclusiva al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, titular de la revista ***Tecnología y Ciencias del Agua***.

Responsabilidad de los autores

La propuesta de un trabajo compromete al autor o autores a no someterlo simultáneamente a la consideración de otras publicaciones. En caso de que el artículo o nota sea entregado a otro medio para su eventual publicación, los autores se comprometen a hacerlo del conocimiento de la Coordinación Editorial, que suspenderá el proceso de arbitraje e informará al Consejo Editorial sobre la decisión tomada por los autores; esta misma suspensión tendrá efecto si la revista ***Tecnología y Ciencias del Agua*** identifica y corrobora una situación similar.

La responsabilidad del contenido, originalidad y autenticidad de los artículos o notas corresponde a los autores.

Los autores son responsables de la calidad del español e inglés que utilicen. Si su redacción es deficiente, se rechazará su contribución. La revista ***Tecnología y Ciencias del Agua*** sólo se hará cargo del cuidado editorial.

Los autores se comprometen a realizar los ajustes que sean señalados por el editor temático en el tiempo fijado por éste; en caso de incumplimiento, el artículo o nota será retirado del proceso de dictaminación y será calificado como rechazado.

Los autores deberán estar atentos para resolver las dudas y propuestas que presenten el editor y el coordinador editorial.

Los autores deberán aprobar las pruebas finales de imprenta de sus textos.

Los autores de la revista aceptan formar parte del grupo de árbitros de la revista ***Tecnología y Ciencias del Agua***, con la responsabilidad que ello implica.

Los autores deben basarse en la "Guía para colaboradores" para remitir sus artículos o notas.

Una vez que reciban la carta de aceptación para publicar su artículo o nota, los autores no podrán incluir a ningún otro autor.

Los autores sólo podrán eliminar a un autor del artículo o nota en proceso mediante oficio dirigido a la revista ***Tecnología y Ciencias del Agua***. Dicho oficio debe ir firmado (en papel) tanto por el autor principal como por el autor a quien se pretende eliminar y quien da su consentimiento expreso.

El porcentaje de autocitas en un artículo no podrá ser superior al 20%.

Lectores

Académicos, investigadores, especialistas y profesionales interesados en el análisis, investigación y búsqueda del conocimiento y soluciones de problemas relacionados con el agua.

Recepción de trabajos

La recepción de artículos y notas es permanente.

Periodicidad

Edición bimestral.

Se tendrá una versión *preprint* de los artículos y notas aprobados para ser publicados; esto, sin esperar a integrar un número completo.

Suscripción y distribución

La revista se distribuye por medio de suscripciones pagadas y honorarias.

Acceso abierto

La revista ***Tecnología y Ciencias del Agua*** permite consultar en su versión digital todo el material publicado sin costo, incluyendo el de las revistas que la precedieron: *Irrigación en México*; *Ingeniería hidráulica en México*, primera época; *Recursos hidráulicos*; e *Ingeniería hidráulica en México*, segunda época.

Ediciones especiales y números extraordinarios

La revista ***Tecnología y Ciencias del Agua*** podrá publicar números especiales por sí misma o en colaboración con otras revistas, asociaciones profesionales o casas editoriales de reconocido prestigio relacionadas con el recurso agua. En este caso, todos los trabajos deberán pasar por el proceso de arbitraje establecido en esta Política Editorial.

Asimismo, la revista ***Tecnología y Ciencias del Agua*** podrá publicar artículos por invitación, en reconocimiento a la trayectoria profesional de destacados investigadores.

En ambos casos se cuidará la calidad de los contenidos técnicos y las aportaciones científicas.

Código de ética

El quehacer de la revista ***Tecnología y Ciencias del Agua*** se basa en principios de imparcialidad, objetividad y honestidad.

Tecnología y Ciencias del Agua está registrada en los siguientes índices y resúmenes (abstracts) nacionales e internacionales:

• Thomson Reuters Science Citation Index® (*ISI*) • Expanded Thomson Reuters Research Alert® (*ISI*) • *Índice de revistas mexicanas de investigación científica y tecnológica* del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) (2013-2018) • Sistema de Información Científica Redalyc (Red de Revistas Científicas de América Latina y El Caribe, España y Portugal), Universidad Autónoma del Estado de México • *EBSCO* (Fuente Académica Premier NISC; Geosystems, como Marine, Oceanographic and Freshwater Resources) • *ProQuest* (Cambridge Scientific Abstracts) • *Elsevier* (Fluid Abstracts: Process Engineering; Fluid Abstracts: Civil Engineering) • *CAB Abstracts*, CAB International • *Latindex* (Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal), Universidad Nacional Autónoma de México • *Periódica* (Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias), Universidad Nacional Autónoma de México • *Catálogo Hela* (Hemeroteca Latinoamericana), Universidad Nacional Autónoma de México • *Actualidad Iberoamericana*, CIT-III, Instituto Iberoamericano de Información en Ciencia y Tecnología.

Otras fuentes

También puede encontrarse su acervo en *Google académico*.

Contenido

Inundaciones

Artículos técnicos

Las inundaciones en un marco de incertidumbre climática
Felipe I. Arreguín-Cortés
Mario López-Pérez
Humberto Marengo-Mogollón

Modelos regionales de escurrimientos máximos instantáneos en la república mexicana
Ramón Domínguez-Mora
Maritza L. Arganis-Juárez
Humberto Guzmán-García
Eliseo Carrizosa-Elizondo
Gabriela Esquivel-Garduño
Guadalupe E. Fuentes-Mariles

Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas
Víctor Hugo Alcocer-Yamanaka
José Manuel Rodríguez-Varela
Víctor Javier Bourguett-Ortiz
Oscar Jesús Llaguno-Guilberto
Pedro Misael Albornoz-Góngora

Nota técnica

La necesidad del desarrollo de servicios hidrológicos para la reducción de daños por inundaciones
Angel Luis Aldana-Valverde

Sequía

La política pública contra la sequía en México: avances, necesidades y perspectivas
Felipe I. Arreguín-Cortés
Mario López-Pérez
David Ortega-Gaucin
Óscar Ibañez-Hernández

Revisión histórica de las sequías en México: de la explicación divina a la incorporación de la ciencia
Judith Domínguez

Ciudades y sequía en México. La gestión del agua como estrategia crítica de mitigación
Nicolás Pineda-Pablos
Alejandro Salazar-Adams

Considerations for a Research Program on Drought in Mexico
Víctor Magaña

Formulación simplificada de un índice de sequía, empleando una distribución de probabilidad mezclada
Alfonso Gutiérrez-López
José Vargas-Baecheler
Víctor Reséndiz-Torres
Ivonne Cruz-Paz

La sequía de la península de Yucatán
Héctor Estrada-Medina
Víctor Cobos-Gasca
José Luis Acosta-Rodríguez
Sergio Peña Fierro
Mariela Castilla-Martínez
Claudia Castillo-Carrillo
Santiago Franco-Brito
Diana López-Castillo
Mariana López-Díaz
Wendy Luna-Flores
Andrés Maldonado-Repetto
Oscar Álvarez-Rivera
José Luis Cámara-Romero
Andrés Morales-Guadrrama
Ana María Moreno-Arjona
Biiniza Pérez-Niño
Pamela Rodríguez-Lara
Rosa Linda Zapata-Luna

Análisis tripartita de escurrimientos naturales: aplicación a la caracterización de sequías en el río Colorado
Álvaro A. Aldama

El monitor de la sequía en México
René Lobato-Sánchez

Discusión

Guía para colaboradores

Contents

Floods

Technical articles

Flooding in a Context of Climate Uncertainty 5
Felipe I. Arreguín-Cortés
Mario López-Pérez
Humberto Marengo-Mogollón

Regional Models for Instant Maximum Annual Flows in Mexican Republic 15
Ramón Domínguez-Mora
Maritza L. Arganis-Juárez
Humberto Guzmán-García
Eliseo Carrizosa-Elizondo
Gabriela Esquivel-Garduño
Guadalupe E. Fuentes-Mariles

Methodology for Generating Flood Risk Maps in Urban Areas 33
Víctor Hugo Alcocer-Yamanaka
José Manuel Rodríguez-Varela
Víctor Javier Bourguett-Ortiz
Oscar Jesús Llaguno-Guilberto
Pedro Misael Albornoz-Góngora

Technical note

The Necessity of the Development of Hydrological Services for the Reduction of Flood Damages 57
Angel Luis Aldana-Valverde

Drought

Public Policy against Drought in Mexico: Progress, Needs and Perspectives 63
Felipe I. Arreguín-Cortés
Mario López-Pérez
David Ortega-Gaucin
Óscar Ibañez-Hernández

Historical Review of Droughts in Mexico: From the Divine Explanation to the Incorporation of Science 77
Judith Domínguez

Cities and Drought in Mexico. Water Management as a Mitigation Critical Strategy 95
Nicolás Pineda-Pablos
Alejandro Salazar-Adams

Consideraciones para un programa de investigación de la sequía en México 115
Víctor Magaña

Simplified Design of a Drought Index, Using a Mixed Probability Function 135
Alfonso Gutiérrez-López
José Vargas-Baecheler
Víctor Reséndiz-Torres
Ivonne Cruz-Paz

The Drought of the Yucatan Peninsula 151
Héctor Estrada-Medina
Víctor Cobos-Gasca
José Luis Acosta-Rodríguez
Sergio Peña Fierro
Mariela Castilla-Martínez
Claudia Castillo-Carrillo
Santiago Franco-Brito
Diana López-Castillo
Mariana López-Díaz
Wendy Luna-Flores
Andrés Maldonado-Repetto
Oscar Álvarez-Rivera
José Luis Cámara-Romero
Andrés Morales-Guadrrama
Ana María Moreno-Arjona
Biiniza Pérez-Niño
Pamela Rodríguez-Lara
Rosa Linda Zapata-Luna

Three-Part Decomposition of Natural Flows: Applicationto the Colorado River Drought Characterization 167
Álvaro A. Aldama

The Drought Monitor in Mexico 197
René Lobato-Sánchez

Discussion

Contributor's guide

IMTA
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

http://www.imta.gob.mx/tyca