



ISSN 2007-2422

Tecnología y Ciencias del Agua



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

Consejo Editorial

Editor en Jefe

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

Editor en Agua y Energía

Dr. Humberto Marengo Mogollón
Comisión Federal de Electricidad

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. Enrique 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
Comisión Nacional 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:** Marco Antonio Bonilla Rincón.

• **Dr. Adrián Pedrozo Acuña**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Alcides Juan León Méndez**, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Cuba • **Dr. Aldo Iván Ramírez Orozco**, Centro del Agua para América Latina y el Caribe, México • **Dr. Alejandro López Alvarado**, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile • **Dr. Álvaro A. Aldama Rodríguez**, consultor independiente • **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. Arturo Marciano**, Asociación Internacional de Ingeniería e Investigaciones Hidráulicas, Venezuela • **Dr. Carlos Díaz Delgado**, Universidad Autónoma del Estado de México • **Dr. Carlos Puente**, Universidad de California en Davis, Estados Unidos • **Dr. Cleverson Vitorio Andreoli**, Andreoli Engenheiros Associados, Brasil • **Dr. Daene McKinney**, Universidad de Texas en Austin, Estados Unidos • **Dr. Daniel Murillo Licea**, Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social • **Dr. Eduardo Varas Castellón**, Pontificia Universidad Católica de Chile • **Dr. Enrique Cabrera Marcet**, Universidad Politécnica de Valencia, España • **Dr. Enrique Playán Jubillar**, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España • **Dr. Ernesto José González Rivas**, Universidad Central de Venezuela • **Dr. Federico Estrada**, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, España • **Dr. Fedro Zazueta**, Universidad de Florida, Estados Unidos • **Dra. Gabriela Eleonora Moeller Chávez**, Universidad Politécnica del Estado de Morelos • **Dr. Gerardo Buelna**, Dirección de Medio Ambiente y Centro de Investigación Industrial de Quebec, Canadá • **Dr. Gueorguiev Tzatchkov Velitchko**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Ing. Héctor Garduño Velasco**, consultor internacional • **Dr. Ismael Mariño Tapia**, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México • **Dr. Ismael Piedra Cueva**, Universidad de la República, Uruguay • **Dr. Jaime Collado**, Comité Nacional Mexicano para la Comisión Internacional de Irrigación y Drenaje • **Dr. Jaime Iván 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**, Universidad de Colorado, Estados Unidos • **Dr. José Joel Carrillo Rivera**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Juan Pedro Martín Vide**, Universidad Politécnica de Cataluña, España • **Dr. Julio Kuroiwa**, 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**, Waterloo University, Canadá • **Dr. Luis Texeira**, Instituto de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Ambiental, Uruguay • **Dra. Luisa Paré Ouellet**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Ing. Manuel Contijoch Escontria**, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, México • **Dr. Marcos Von Sperling**, Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil • **Dra. María Claudia Campos Pinilla**, Universidad Javeriana, Colombia • **Dra. María Luisa Torregrosa**, Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, México • **Dra. María Rafaela de Saldanha Matos**, Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil, Portugal • **Dra. María Victoria Vélez Otálvaro**, Universidad Nacional de Colombia • **Dr. Michel Rosengaus Moshinsky**, Consultor independiente • **Dr. Moisés Berezowsky Verduzco**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dra. Natalia Uribe Pando**, Water Lex, Suiza • **Dr. Óscar F. Ibáñez Hernández**, Consultor independiente • **Dr. Paulo Salles Alfonso de Almeida**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Rafael Pardo Gómez**, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cuba • **Dr. Rafael Val Segura**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **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 de Argentina • **Dr. Rodolfo Silva Casarín**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Serge Léonard Tamari Wagner**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Dr. Simón González**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Dr. Víctor Hugo Alcocer Yamanaka**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Dra. Ximena Vargas Mesa**, Universidad de Chile •

© **TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA**, vol. V, núm. 5, septiembre-octubre de 2014, 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@taloc.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 octubre de 2014.

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).



Para suscripciones, dé clic aquí



Para comentarios a la Coordinación Editorial, dé clic aquí



Tecnología y Ciencias del Agua

Vol. V, núm. 5, septiembre-octubre de 2014

Portada: estación de muestreo, cascada San Pedro, San Pedro Amatlá, Puebla, México. La mayor proporción de aguas superficiales en el estado de Puebla se encuentra en la Sierra Norte, en donde es empleada principalmente en la agricultura, seguida de la industria, acuicultura y terapia. A los cauces de los ríos se vierte agua de origen residual, derivada de las industrias y de los distintos poblados que se encuentran en dicha zona. Al contar con agua superficial todo el año, los agricultores la usan para el riego de las principales especies agrícolas, utilizándola como fuente directa, es decir, sin un acondicionamiento previo. Con estos antecedentes, se plantea que los materiales geológicos de la zona y los vertidos de agua residual modifican la concentración cualitativa y cuantitativa de los iones en solución, esto es, modifican la calidad del agua. Como el agua superficial de diferente origen y concentración se utiliza en la agricultura, en este estudio se determinó la composición química y las concentraciones totales electrolíticas, con el objetivo de evaluar su calidad para uso agrícola. Ver el artículo “Calidad del agua para riego en la sierra norte de Puebla, México” de Álvaro Can-Chulim *et al.* (pp. 77-96).

Foto: Álvaro Can Chulim.





Lago Louise, Alberta, Canadá.

Foto: Rebeca González Villela.

Artículos técnicos

Efectos del aumento del nivel del mar por cambio climático en la morfología de la ría de Celestún, Yucatán

Rogelio Torres-Mota

Paulo Salles-Afonso-de-Almeida

José López-González

Transferencia de sedimentos de una microcuenca a la red de drenaje urbano

Guillermo José Mendez

Carlos Alberto Depettris

Jorge Víctor Pilar

Oscar Orfeo

Alejandro Ricardo Ruberto

Estimación del potencial de tormentas vía la combinación de imágenes satelitales e información meteorológica: caso de estudio al noroeste de México

Fabiola Arellano-Lara

Carlos Escalante-Sandoval

Criterios hidrodinámicos para el diseño de sistemas de recirculación en acuicultura

Juan A. García-Aragón

Humberto Salinas-Tapia

Víctor Díaz-Palomarez

Boris M. López-Rebollar

Javier Moreno-Guevara

Leonarda M. Flores-Gutiérrez

Calidad del agua para riego en la Sierra Norte de Puebla, México

Álvaro Can-Chulim

Héctor Manuel Ortega-Escobar

Edgar Iván Sánchez-Bernal

Elia Cruz-Crespo

Contenido de boro en el agua superficial de Puebla, Tlaxcala y Veracruz

Oscar Raúl Mancilla-Villa

Ana Laura Bautista-Olivas

Héctor Manuel Ortega-Escobar

Carlos Ramírez-Ayala

Amada Laura Reyes-Ortigoza

Héctor Flores-Magdaleno

Diego Raymundo González-Eguiarte

Rubén Darío Guevara-Gutiérrez

Suelos de humedal del lago de Pátzcuaro, Michoacán, México

Lenin E. Medina-Orozco

Norma E. García-Calderón

Felipe García-Oliva

Elena Ikkonen

Technical articles

Effects of Increased Sea Levels from Climate Change on the Celestún Estuary Morphology 5

Rogelio Torres-Mota

Paulo Salles-Afonso-de-Almeida

José López-González

Sediment Transfer from a Microbasin to an Urban Drainage Network 21

Guillermo José Mendez

Carlos Alberto Depettris

Jorge Víctor Pilar

Oscar Orfeo

Alejandro Ricardo Ruberto

Estimation of Storm Potential by Combining Satellite Images and Meteorological Data: A Case Study in Northwestern Mexico 39

Fabiola Arellano-Lara

Carlos Escalante-Sandoval

Hydrodynamic Criteria to Design Water Recirculation Systems for Aquaculture 63

Juan A. García-Aragón

Humberto Salinas-Tapia

Víctor Díaz-Palomarez

Boris M. López-Rebollar

Javier Moreno-Guevara

Leonarda M. Flores-Gutiérrez

Irrigation Water Quality in the Sierra Norte in Puebla, México 77

Álvaro Can-Chulim

Héctor Manuel Ortega-Escobar

Edgar Iván Sánchez-Bernal

Elia Cruz-Crespo

Content of Boron in Surface Water in Puebla, Tlaxcala, and Veracruz 97

Oscar Raúl Mancilla-Villa

Ana Laura Bautista-Olivas

Héctor Manuel Ortega-Escobar

Carlos Ramírez-Ayala

Amada Laura Reyes-Ortigoza

Héctor Flores-Magdaleno

Diego Raymundo González-Eguiarte

Rubén Darío Guevara-Gutiérrez

Wetland Soils from Lake Patzcuaro, Michoacan, Mexico 111

Lenin E. Medina-Orozco

Norma E. García-Calderón

Felipe García-Oliva

Elena Ikkonen

Percepciones y realidades de la contaminación en la comunidad minera San José de Avino, Durango María de Lourdes Corral-Bermúdez †Noelia Rivera-Quintero Eduardo Sánchez-Ortiz	<i>Perceptions and Realities about Pollution in the Mining Community of San José de Avino, Durango</i> María de Lourdes Corral-Bermúdez †Noelia Rivera-Quintero Eduardo Sánchez-Ortiz	125
Diseño óptimo de la red de monitoreo del acuífero "Saltillo-Ramos Arizpe" para el adecuado manejo del recurso hídrico, aplicando un enfoque geoestadístico Martín A. Díaz-Viera Félix Canul-Pech	<i>A Geostatistical Approach to the Optimal Design of the "Saltillo-Ramos Arizpe" Aquifer Monitoring Network for Proper Water Resources Management</i> José Cristóbal Medina-González Gabriel Díaz-Hernández	141
Esquema de cobro del servicio hidrológico que provee la cuenca alta del Pixquiac Marta Magdalena Chávez-Cortés Karla Erika Mancilla-Hernández	<i>Charging Scheme for Hydrological Services Provided by the Upper Pixquiac River Watershed</i> Marta Magdalena Chávez-Cortés Karla Erika Mancilla-Hernández	161
Modelamiento matemático de caudales recesivos en la región mediterránea andina del Maule; el caso del estero Upeo, Chile Francisco Balocchi Roberto Pizarro Carolina Morales Claudio Olivares	<i>Mathematical Modeling of Recessive Flows in the Andean Mediterranean Region of Maule; Case Study of Estero Upeo, Chile</i> Francisco Balocchi Roberto Pizarro Carolina Morales Claudio Olivares	179
Notas técnicas	Technical notes	
Evaluación de criterios de selección de modelos probabilísticos: validación con series de valores máximos simulados Roberto S. Flowers-Cano Robert Jeffrey Flowers Fabián Rivera-Trejo	<i>Evaluation of Probabilistic Model Selection Criteria: Validation with Series of Simulated Maxima</i> Roberto S. Flowers-Cano Robert Jeffrey Flowers Fabián Rivera-Trejo	189
Predicciones extremas de lluvia en 24 horas en el estado de Zacatecas, México Daniel Francisco Campos-Aranda	<i>Extreme 24-Hour Rainfall Predictions in the State of Zacatecas, Mexico</i> Daniel Francisco Campos-Aranda	199
Discusión Guía para colaboradores	<i>Discussion</i> <i>Contributor's guide</i>	227 229

Efectos del aumento del nivel del mar por cambio climático en la morfología de la ría de Celestún, Yucatán

• Rogelio Torres-Mota* • Paulo Salles-Afonso-de-Almeida •

• José López-González •

Universidad Nacional Autónoma de México

*Autor de correspondencia

Resumen

Torres-Mota, R., Salles-Afonso-de-Almeida, P., & López-González, J. (septiembre-octubre, 2014). Efectos del aumento del nivel del mar por cambio climático en la morfología de la ría de Celestún, Yucatán. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(5), 5-20.

Se evaluaron los efectos de un potencial incremento del nivel medio del mar sobre la morfología de un sistema lagunar por medio del análisis de estabilidad de la boca de comunicación con el mar. Para llevar a cabo lo anterior, el estudio se dividió en dos fases: a) obtención del clima marítimo a través de series de tiempo obtenidas como resultados de retroanálisis históricos para conocer los principales parámetros oceanográficos, complementado con el análisis de datos medidos *in situ* para una caracterización hidrodinámica actual del sistema lagunar; b) modelación de la respuesta hidrodinámica de la ría a dos escenarios de aumento del nivel del mar (25 y 50 cm) con base en los estudios del Grupo Intergubernamental del Cambio Climático, haciendo énfasis en cambios en el sistema de flujos, corrientes y prisma de marea, capacidad de transporte de sedimento y distorsión de la marea. Los resultados del presente trabajo muestran que las velocidades máximas del flujo a través de la boca lagunar aumentaron en un 18 y 29%, en relación con la condición actual para cada escenario modelado, lo cual, aunado a variaciones de las duraciones del flujo y el reflujo, sugiere que el sistema costero de Celestún presenta una capacidad adaptativa para mantener cierto nivel de equilibrio morfológico ante un aumento del nivel medio del mar. El transporte de sedimento neto no depende sólo de la dirección de la corriente residual, sino también de la distorsión de los campos de velocidades y de los valores de velocidad máxima de flujo y reflujo.

Palabras clave: aumento del nivel medio del mar, laguna costera, estabilidad de boca lagunar, flujo y reflujo de marea, distorsión de marea.

Abstract

Torres-Mota, R., Salles-Afonso-de-Almeida, P., & López-González, J. (September-October, 2014). Effects of Increased Sea Levels from Climate Change on the Celestún Estuary Morphology. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(5), 5-20.

This work evaluates the effect of potential increases in mean sea levels on the morphology of a lagoon system using a stability analysis of the lagoon's inlet with the sea. To this end, the study was divided into two phases: a) obtaining the maritime climate through a time-series resulting from a historical retro-analysis to identify the main oceanographic parameters, complemented with an analysis of data measured *in situ* to characterize the current hydrodynamics of the lagoon system and b) modeling the hydrodynamic response of the estuary for two scenarios for increased sea levels (25 and 50 cm) based on studies by the Intergovernmental Panel on Climate Change, with an emphasis on changes in flow systems, currents and tides, sediment transport capacity and tidal distortion. The results of the present work show that maximum flow velocities through the lagoon inlet increased 18 and 29% over the current condition for each scenario modeled. In addition to variations in flow and ebb duration, this suggested that the Celestún coastal system has the adaptive capacity to maintain a certain degree of morphological equilibrium for a given mean increase in sea levels. Net sediment transport does not only depend on the direction of the residual current but also on the distortion in velocity fields and in maximum flow and ebb velocity values.

Keywords: Increase in mean sea level, lagoon coast, lagoon inlet stability, sea flow and ebb, tidal distortion.

Recibido: 26/09/12
Aprobado: 24/01/14

Introducción

La zona costera es una franja espacial marítimo-terrestre de ancho y constitución varia-

ble, en la cual ocurre la interacción entre diferentes componentes marinos y terrestres, y constituye uno de los lugares que alberga la mayor diversidad de ambientes y recursos

que interactúan, creando ecosistemas con características ambientales, climáticas, geomorfológicas e hidrológicas únicas en el planeta (Botello, Villanueva, Gutiérrez, & Rojas, 2010). Debido a lo anterior es que surge el interés por evaluar las repercusiones de una intensificación del clima marítimo en la morfología costera (p. ej., erosión de las playas, desestabilización de las bocas en las lagunas costeras y estuarios).

El aumento paulatino del nivel medio del mar (nmm), en conjunto con el hundimiento de tierras, han hecho de algunas zonas costeras áreas especialmente vulnerables a la erosión e inundación, por lo que se ha intensificado el estudio sobre el sistema climático de la tierra y desarrollado nuevos modelos (Battjes, 2006). Por ejemplo, se ha estimado un aumento del nmm para el presente siglo del orden de 0.4 m (IPCC, 2007) y en cálculos más recientes, tasas que generarían un aumento de 0.15 m del año 2010 al año 2100, que sumado a una aceleración de, por ejemplo, 0.10 mm/año², ascendería a 79 cm (Houston & Dean, 2011).

En México existen extensiones de litoral con una configuración geomórfica poco elevada y constituidas de material fino no cohesivo, que les confiere el carácter de planicies susceptibles a inundaciones de origen fluvial o marino en caso de sobre-elevaciones sustanciales. Las riquezas marinas del litoral mexicano, siendo tratadas de una manera sustentable, son una fuente inagotable de recursos, y su uso comprende una parte medular en el desarrollo científico y tecnológico. Dentro de las zonas vulnerables a un incremento del nivel medio del mar en la cuenca geológica del Golfo de México se encuentra la península de Yucatán (Ortiz-Pérez & Méndez-Linares, 1999; Yañez-Arancibia, 2010) y como un caso particular se estudia el cuerpo lagunar de la ría de Celestún, localizada al poniente de la península. Esta laguna costera constituye una reserva de la biosfera debido a la cantidad y tipo de ecosistemas que en ella subsisten, los cuales sirven de hábitat para diferentes especies y son una fuente de recursos pesqueros aprovechados por comunidades

asentadas en sus márgenes (Conanp, 2000). Lo anterior le concede el carácter de unidad costera altamente vulnerable a alteraciones tanto naturales como inducidas por el hombre, y con un alto grado de impacto y repercusiones tanto para el ser humano como para especies de flora y fauna, en caso de modificaciones que alteren su equilibrio natural.

En vista de lo anterior, se estudian los efectos que posibles y probables aumentos del nivel el mar puedan tener en la morfología de la zona costera, principalmente los fenómenos de erosión e inundación. En el caso de las lagunas costeras, dichas modificaciones en el nivel del mar pueden causar cambios importantes en la hidrodinámica, que a su vez repercuten en la morfodinámica y la estabilidad de dichos sistemas. En este trabajo se analizó el efecto de un aumento del nmm sobre las corrientes y flujos; se puso especial atención en la boca que comunica el cuerpo costero con el mar, así como las repercusiones en el potencial de transporte de sedimento; finalmente se evaluó la vulnerabilidad e implicaciones físicas a futuro de la ría de Celestún. La hipótesis principal de este estudio fue que la dinámica lagunar de un cuerpo costero como la ría de Celestún con una comunicación permanente con el mar puede ser alterada por una intensificación del clima marítimo debido a la modificación en las condiciones del flujo de marea que atraviesa la boca lagunar.

Área de estudio

La ría de Celestún se localiza en la costa noroccidental de la península de Yucatán, México, entre las coordenadas 20° 42', 21" N, y 90° 18', 90° 33' O, y forma parte de la cuenca hidrológica de Chicxulub, cuyo límite funcional está constituido por el anillo de Cenotes (Batllori, Gonzáles, Díaz & Febles, 2005). La hidrología de la región es regulada por un manto rocoso superficial, que a su vez está compuesto de dos capas: una exterior, denominada coraza calcárea (conocida localmente como *caliche*),

impermeable y de mayor dureza, y una interior, compuesta de roca caliza sedimentaria porosa por donde se propaga el agua subterránea desde la parte alta de la cuenca hasta la costa. La existencia de grietas en el *caliche* permite el afloramiento del agua subterránea en forma de petenes y ciénagas. La ría es un cuerpo de agua semicerrado, con una comunicación al mar permanente a través de una boca lagunar. Su longitud aproximada en el eje mayor es de 24 km y el ancho varía de 140 m a 2.3 km, con un volumen estimado en un rango que va de $12.59 \times 10^6 \text{ m}^3$ a $38.25 \times 10^6 \text{ m}^3$, para las épocas de secas y lluvias, respectivamente (Batllori et al., 1987).

Las profundidades del cuerpo de la ría van de los 3 m en el área cercana a la boca, pasando por 1.7 m en la parte media hasta 0.50 m al norte del sistema, figura 1. Sobre la barra de arena que separa la ría del mar existe un conjunto de charcas salineras con una profundidad media de 0.30 m. En la parte oriente se muestra la zona intermareal (con un ancho promedio de 7 km), que comprende desde la franja del mangle que delimita el oriente del cuerpo lagunar hasta el límite de inundación máxima (1 m sobre el nivel medio del mar).

El rango de salinidad del cuerpo lagunar va de 2.6 ups en abril a 15.3 ups en julio; el clima de la región es cálido-semiseco y la temperatura media anual del agua de la laguna es de 27.4 °C, y de la región 26.5 °C. La precipitación y evaporación media anual son de 767 y 1 400 mm, respectivamente, y debido a su localización, en la época de invierno, la ría recibe los vientos *nortes*, que generan las condiciones atmosféricas y oceanográficas de mayor energía en el año (Duch, 1988).

Metodología

Para evaluar los efectos del cambio climático sobre la morfología costera es necesario determinar en primera instancia las posibles repercusiones de éste sobre el clima marítimo (nivel medio del mar, oleaje y corrientes), para después determinar cuál de los cambios en dichas variables afectará en mayor medida

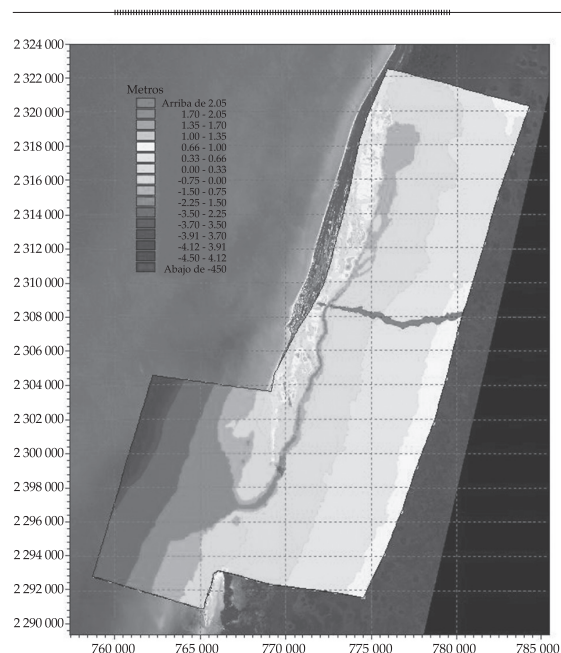


Figura 1. Batimetría de la laguna costera de la ría de Celestún y zonas de muestreo.

la morfología del sistema lagunar (Torres-Mota, Salles, Mariño, & López, 2012). Una vez determinadas las variables de estudio, se deben investigar sus registros históricos y evaluar sus condiciones actuales, para después determinar las condiciones futuras. Para estimar las condiciones presentes y futuras de la física de la laguna se usó un modelo numérico hidrodinámico, por medio del cual se estudió el sistema actual de corrientes y elevaciones de la superficie del mar, evaluados dos escenarios de incremento del nmm, emitidos por el IPCC (2007). Como última etapa se analizaron las condiciones de flujo y reflujo en la boca que comunica a la ría con el mar, sus implicaciones en las tasas de transporte potencial de sedimentos a través de ella y las repercusiones en la estabilidad del sistema lagunar.

Datos históricos

Con el objetivo de conocer las condiciones marítimas históricas del sitio de interés, se realizó un análisis de viento, oleaje normal y extremal, a partir de una serie de tiempo histó-

rica de 30 años, que provino de un retroanálisis realizado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Appendini *et al.*, 2012), para un área que comprende el Golfo de México y el mar Caribe (la serie de tiempo fue extraída de las coordenadas 90.60° O y 20.74° N). El análisis y la caracterización de las variables de estudio se dividió en dos: (1) análisis estadístico de los datos de oleaje, y (2) análisis extremal a los datos de viento y de oleaje. La serie de tiempo de 30 años fue dividida en cuatro partes: a) primavera (P), del 21 de marzo a 20 de junio; b) verano (V), del 21 de junio al 20 de septiembre; c) otoño (O), del 21 de septiembre al 20 de diciembre, y d) invierno (I), del 21 de diciembre al 20 de marzo. De esta manera se dividió cada año de la serie en cuatro estaciones, se juntaron las épocas de cada año (p. ej., todas las épocas de P) y se obtuvieron los resultados para cada una de ellas.

Muestreo y métodos en el análisis de variables ambientales

Se llevó a cabo una campaña de campo en el área de estudio, con el fin de obtener datos de las variables ambientales de interés para la caracterización de la ría de Celestún y generar datos de entrada para las simulaciones numéricas, las cuales abarcaron al cuerpo lagunar y sus dos áreas adyacentes: la barra arenosa y la zona intermareal (zona inundable), al poniente y al oriente del cuerpo lagunar, respectivamente. Las variables ambientales observadas en la parte marítima fueron elevación de la superficie del mar, corrientes y oleaje. En la zona central se registró la variación de la superficie del agua, gasto, salinidad y temperatura en el punto de colocación del sensor. En la zona norte se registraron la elevación de la superficie, temperatura y salinidad. En la zona terrestre se obtuvieron las cotas del terreno, con el objetivo de determinar la configuración del terreno adyacente al cuerpo lagunar y definir, con apoyo de imágenes de satélite, las zonas inundables durante pleamares de mareas vivas y sobreelevaciones extraordinarias.

Descripción y calibración del modelo numérico

El modelo utilizado para la determinación de la hidrodinámica del cuerpo lagunar fue el modelo *MIKE21*, que resuelve numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes para un flujo bidimensional e incompresible. La implementación del modelo consistió en generar la malla de cálculo (abarcando el cuerpo lagunar, la barra de arena y la zona intermareal al oriente), la cual fue discretizada en elementos triangulares con una resolución variable, sobre la cual se resolvieron las ecuaciones primitivas de continuidad y momentum por medio del método de volúmenes finitos. La configuración del fondo lagunar y el tipo de material del que esté compuesto (arena, materia orgánica, vegetación) generan distintos ambientes friccionantes, los cuales producen cambios de amplitud y fase en la onda de marea por disipación y transferencia de energía. Las ecuaciones de continuidad y momentum horizontal en los ejes x y y integradas en la vertical son, respectivamente:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} &= f\bar{v}h - gh\frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial x} \\ &- \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{sx}}{\partial \rho_0} - \frac{\partial \tau_{bx}}{\partial \rho_0} - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y}\right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} &= f\bar{u}h - gh\frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial y} \\ &- \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{sy}}{\partial \rho_0} - \frac{\partial \tau_{by}}{\partial \rho_0} - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y}\right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned} \quad (3)$$

Los esfuerzos laterales T_{ij} incluyen la fricción por viscosidad, fricción turbulenta y la advección diferencial, calculadas por medio de la formulación de viscosidad de remolino basada en los gradientes de velocidad promediados en la profundidad. En el cuadro 1 se definen las variables en las ecuaciones de gobierno.

El principal parámetro de calibración fue la rugosidad de fondo, la cual fue considerada en el modelo realizando una zonificación de dichos ambientes, asignándoles una rugosidad determinada, dependiendo de la zona de que se tratara, siendo éstas las zonas del océano, cuerpo lagunar y áreas adyacentes.

Los parámetros físicos y condiciones principales que incluye el modelo hidrodinámico son:

- Parámetros de dominio y tiempo:
 - Malla computacional y batimetría; secado y mojado de áreas.
 - Longitud de simulación e incremento de tiempo.
- Factores de calibración:
 - Dispersión del momentum.
 - Esfuerzos de fondo.
 - Esfuerzo de tensión del viento.
- Fuerza de Coriolis.
- Condiciones iniciales.
 - Nivel de la superficie del mar.

- Componentes de la velocidad de corriente.
- Gradientes de presión barométrica.
- Potencial de marea.
- Precipitación/evaporación.
- Condiciones de frontera:
 - Cerrada.
 - Nivel del mar.
 - Descarga.
- Otros elementos forzantes:
 - Dirección y velocidad del viento.
 - Marea.
 - Esfuerzos de radiación del oleaje.
 - Fuentes y sumideros.

Algunas de las limitaciones y condicionantes del modelo son: 1) los modelos simplifican necesariamente la configuración topobatómetrica del espacio a estudiar, a pesar de que en zonas de mayor interés se procura que los levantamientos topobatómetricos sean de alta resolución; 2) necesidad de condiciones de frontera detalladas, se requiere de mediciones de flujo o nivel del mar, que pueden estar localizadas en zonas poco accesibles o de difícil identificación (p. ej., descargas difusas de agua dulce del acuífero hacia la laguna); 3) el mojado y secado de algunas áreas puede generar flujos bidireccionales y ondas internas ajenas al sistema; 4) necesidad de recalibración cuando se actualiza la batimetría; 5) el modelo está

Cuadro 1. Definición de las variables en las ecuaciones de gobierno.

Variable/ símbolo	Definición	Variable/ símbolo	Definición
x, y	Coordenadas cartesianas	h	Profundidad
η	Elevación de la superficie del mar	t	Tiempo
ρ	Densidad del agua	ρ_0	Densidad de referencia del agua
P_a	Presión atmosférica	g	Aceleración de la gravedad
S	Descarga	f	Parámetro de Coriolis
u, v	Velocidades en las direcciones x y y promediadas en la vertical	τ_{bx}, τ_{by}	Componentes del esfuerzo de fondo
$T_{xx}, T_{xy}, T_{yx}, T_{yy}$	Componentes del esfuerzo lateral	τ_{bx}, τ_{by}	Componentes del esfuerzo superficial por viento
$S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}, S_{yy}$	Componentes del tensor de radiación	u_s, v_s	Velocidad de descarga de la fuente

integrado en la vertical, impidiendo de esta manera conocer los procesos que ocurren en la columna de agua.

En la figura 2 se muestra la malla de cálculo computacional, en la que se puede apreciar los tamaños de los elementos triangulares que la componen, cuyo tamaño oscila entre 200 m (zona oceánica) a 30 m (canal central).

Escenarios de intensificación del IPCC

Se establecieron los escenarios de aumento del nivel del mar con base en los estudios del IPCC (Grupo Intergubernamental del Cambio Climático), el cual emitió un rango de valores probables de aumento del nivel del mar para diversos escenarios (Nakićenović & Swart, 2000). Dentro de éstos, se estimó para el periodo 2009-2099 (sobre las bases de un uso equilibrado de combustibles fósiles para la

obtención de energía), una tasa de 0.425 cm/año, equivalente a un aumento del nmm de 21.25 cm en 50 años y de 42.5 cm en 100 años (IPCC, 2007). Aunado a las cifras anteriores, el mismo organismo indica que debe incorporarse la contribución del flujo de hielo en los polos, lo que genera unos valores finales de 25 y 50 cm para 50 y 100 años, respectivamente. Por otro lado, en un estudio realizado por Zavala-Hidalgo, De Buen-Kalman, Romero-Centeno y Hernández-Maguey (2010), en donde se realizó un análisis de las tendencias de la variación del nivel del mar en las costas mexicanas, se indica que para los sitios más cercanos al área de estudio —Ciudad del Carmen, Campeche, y Progreso, Yucatán—, las tendencias se estimaron de $3.4 \pm 1 \text{ mm año}^{-1}$ y $2.5 \pm 1.2 \text{ mm año}^{-1}$, respectivamente. De lo anterior resulta que para los escenarios de 50 y 100 años, las variaciones son de 17 y 34 cm

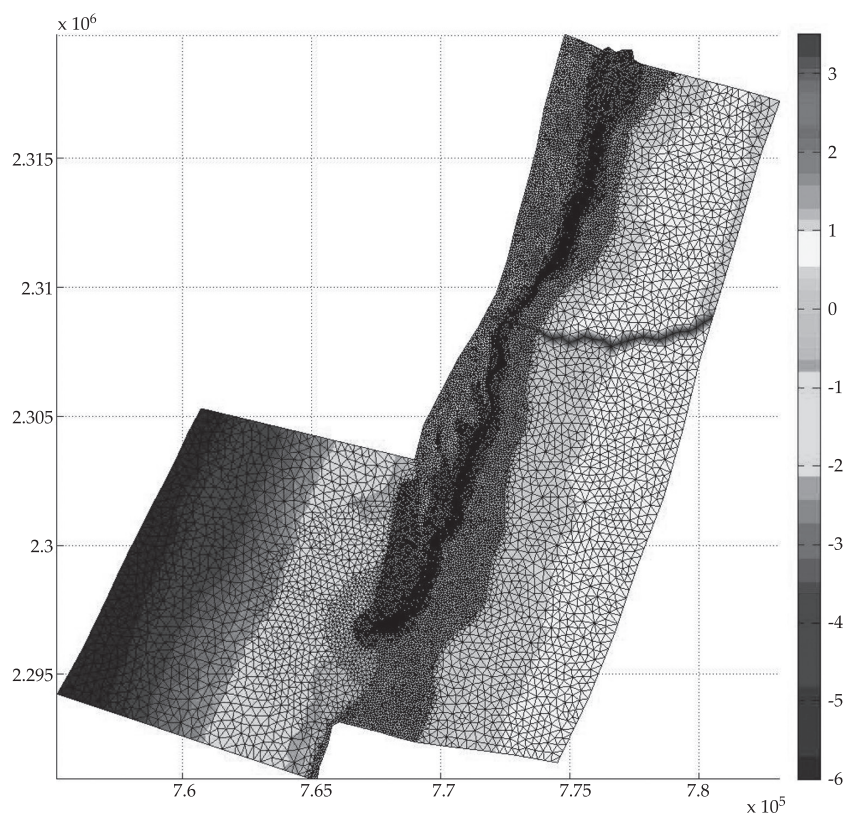


Figura 2. Malla de cálculo computacional de la ría de Celestún (coordenadas UTM).

para Ciudad del Carmen, y 12.5 y 25 cm para Progreso. De las pruebas realizadas se obtuvo que el comportamiento del flujo y reflujo tenía variaciones significativas dentro de los primeros 50 cm, y que las sobreelevaciones de carácter local (entre 12.5 y 34 cm) arrojan resultados incompletos. Por lo anteriormente expuesto y con el objetivo de analizar cambios en los regímenes hidrodinámicos, se establecieron los escenarios de 25 y 50 cm para 50 y 100 años, respectivamente.

Análisis de flujos y corrientes

El análisis de flujo y corrientes en la boca lagunar consistió en determinar los cambios generados en el flujo y reflujo, al evaluar los dos escenarios de aumento del nmm, haciendo énfasis en el prisma de marea y la duración de las dos componentes de un ciclo de marea, flujo y reflujo (Salles, Voulgaris, & Aubrey, 2005). Por otro lado, se evaluaron los cambios en las velocidades máximas de la corriente y en los gastos a través de la boca. Asimismo, se analizó el tipo de régimen, por medio de la distorsión de la onda de marea en la ría de Celestún. Por último, los resultados derivados de dichas simulaciones se compararon con la condición actual (Torres-Mota *et al.*, 2012).

Resultados

Registros in situ y series de tiempo históricas

En los siguientes apartados se describe el análisis estadístico y extremal realizado a las series de tiempo históricas de oleaje y viento, respectivamente.

Oleaje

- Análisis estadístico. El oleaje con mayor energía se presentó en las estaciones de otoño e invierno ($H_s > 2.35$ m), en los meses de septiembre a marzo. La zona marítima externa a la ría mostró un clima medio de baja energía (altura media de 0.50 m), con un periodo medio de 5 s y una dirección de aproximación predominante del NNW (cuadro 2).
- Análisis extremal. Se realizó un ajuste de los datos de cada una de las estaciones para la función de distribución de probabilidad de máximos de Weibull y se dibujaron sus papeles probabilísticos. Como ejemplo, en la figura 3 se presenta el resultado correspondiente a la estación de otoño, que corresponde a la época de huracanes. El ajuste encontrado sugiere que el periodo de retorno de la altura de ola máxima alcanzada

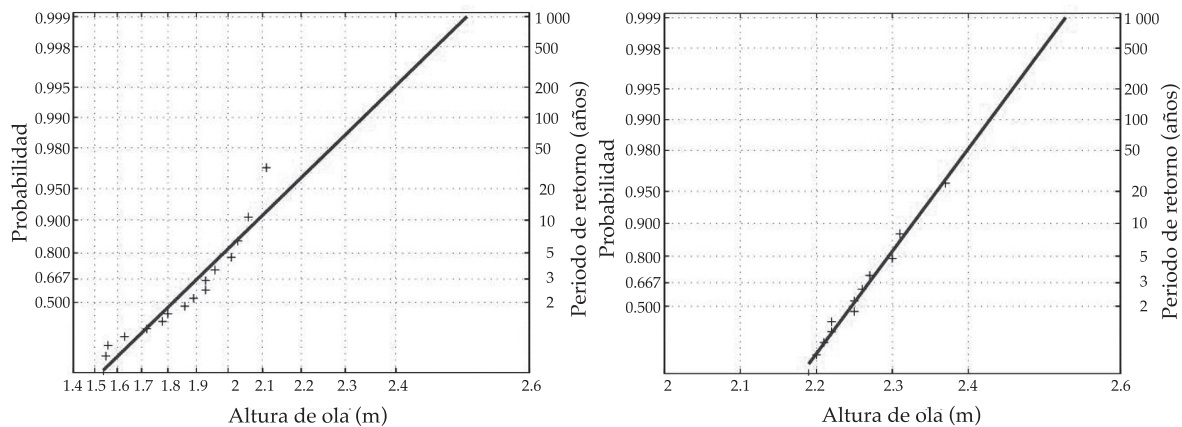


Figura 3. Ajuste de máximos de Weibull para la estación de otoño.

Cuadro 2. Estadística del oleaje para las cuatro estaciones de la serie de tiempo de los años 1979 a 2008 obtenida del retroanálisis.

Estación	H_s	H_{rms}	T_p	θ
	(m)	(m)	(s)	(°)
Primavera				
Máximo	2.28	1.61	13.29	360.00
Promedio	0.58	0.41	4.89	338.06
Mínimo	0.11	0.08	1.85	0.01
Desviación estándar	0.23	0.16	1.56	129.06
Verano				
Máximo	2.21	1.56	16.05	360.00
Promedio	0.42	0.29	4.14	354.23
Mínimo	0.07	0.05	1.85	0.00
Desviación estándar	0.19	0.12	1.30	106.35
Otoño				
Máximo	2.37	1.67	14.38	360.00
Promedio	0.64	0.45	5.92	346.90
Mínimo	0.07	0.05	1.85	0.00
Desviación estándar	0.33	0.23	1.92	155.54
Invierno				
Máximo	2.36	1.67	14.02	360.00
Promedio	0.69	0.49	6.10	341.40
Mínimo	0.13	0.09	1.85	0.00
Desviación estándar	0.36	0.25	1.99	153.70

para la estación de otoño de la serie de tiempo de 30 años (2.37 m) es de 24 años. Con respecto a los escenarios evaluados en el presente estudio de 50 y 100 años, la gráfica indica alturas de ola de 2.39 y 2.43 m, y una probabilidad de ocurrencia menor de 2 y 1%, respectivamente. Para el ajuste de distribución de probabilidad de Weibull, como el mostrado en la figura 3, se usaron las alturas de ola mayores correspondientes a la época de otoño para cada año (30 datos en cada papel probabilístico). Como primera aproximación, los datos mostraron un comportamiento en dos subconjuntos de datos (estadísticamente diferentes), ajustables a dos diferentes líneas de tendencia, y teniendo como umbral un valor aproximado de 2.2 m. La literatura

indica que cuando esto ocurre, se puede optar por dividir los datos en dos papeles probabilísticos, mismos que muestran un ajuste correcto (Abernethy, 2000).

Caracterización de condiciones actuales

Marea

Para determinar la variación de la onda de marea a lo largo del cuerpo lagunar se realizaron mediciones de presión en tres puntos, los cuales, posteriormente, fueron transformados a nivel de la superficie libre del agua referenciados a un mismo banco de nivel (figura 4): a) en la zona marítima externa a la ría (10 km al noroeste de la boca lagunar, datos del 05/03/2009 al 28/10/2009); b) en la parte media del cuerpo lagunar (en el centro de su eje longitudinal mayor, datos del 16/10/2008 al 17/01/2009), y c) en la zona norte o “cabeza” de la ría (datos del 10/10/2008 al 17/11/2008).

La marea medida está compuesta, por un lado, por la marea astronómica, expresada en términos de componentes armónicas, y por otro lado, por la marea meteorológica, que es el resultado del efecto de procesos climáticos (brisas, nortes, tormentas) sobre los cuerpos de agua (mar costero y laguna), y se traduce en oscilaciones de diferente escalas espacio-temporales (p. ej., seiches y marea de tormenta). En el cuadro 3 se muestran las componentes armónicas, de las cuales 17 son significativas, 13 son de origen astronómico y 4 no lineales (MN_4 , M_4 , MKS_2 , $2MS_6$), correspondientes a mareas compuestas y sobrepuestas. La banda de frecuencias diurnas está representada principalmente por las componentes K_1 y O_1 , y las semidiurnas por las componentes M_2 y S_2 . Para determinar el tipo de marea que existe en la ría de Celestún y verificar si existen cambios significativos en su progreso, se calculó el factor de forma (Pugh, 1987), definido como el cociente que resulta de dividir la suma de las amplitudes de las componentes principales de marea diurnas (K_1 y O_1) entre la suma de las amplitudes de las componentes semidiurnas

Cuadro 3. Componentes armónicas de la marea registrada en la zona marina de la ría de Celestún, durante el periodo del 5 de marzo al 28 de octubre de 2009.

Constante armónica	Periodo (h)	Amplitud (m)	Fase (°)
Q_1	26.868	0.04	296.76
O_1	25.92	0.16	306.95
TAU_1	25.67	0.02	160.48
NO_1	24.83	0.02	287.80
P_1	24.07	0.07	324.98
K_1	23.93	0.18	313.31
PHI_1	23.80	0.02	325.94
J_1	23.10	0.01	293.26
OO_1	22.31	0.008	306.71
N_2	12.66	0.007	93.30
M_2	12.42	0.11	111.56
MKS_2	12.38	0.02	137.90
S_2	12.00	0.03	97.62
K_2	11.97	0.01	102.87
MN_4	6.27	0.005	269.71
M_4	6.21	0.007	285.27
$2MS_6$	4.09	0.003	216.83

(M_2 y S_2), y asigna el tipo de régimen según el valor obtenido. Dicho factor fue mayor a 1.5 en las tres zonas del sistema (aumentando el valor de la zona marina a la zona norte, disminuyendo la componente semidiurna y tendiendo a una marea diurna en el norte del sistema), porque el régimen de marea que prevalece en todo el cuerpo de la ría es mixto, con predominancia diurna.

Oleaje y corrientes

Los datos de oleaje registrado comprenden del 13 de octubre de 2008 al 28 de octubre de 2009. Dicha serie fue dividida en tres épocas: huracanes (01/06-30/11), nortes (01/12-último día de febrero) y calmas (1/03-31/05). La dirección predominante, para las tres épocas fue del cuadrante N-ESE (figura 5) del cual provino el 43% del oleaje para la época de huracanes y el 47% para la época de nortes.

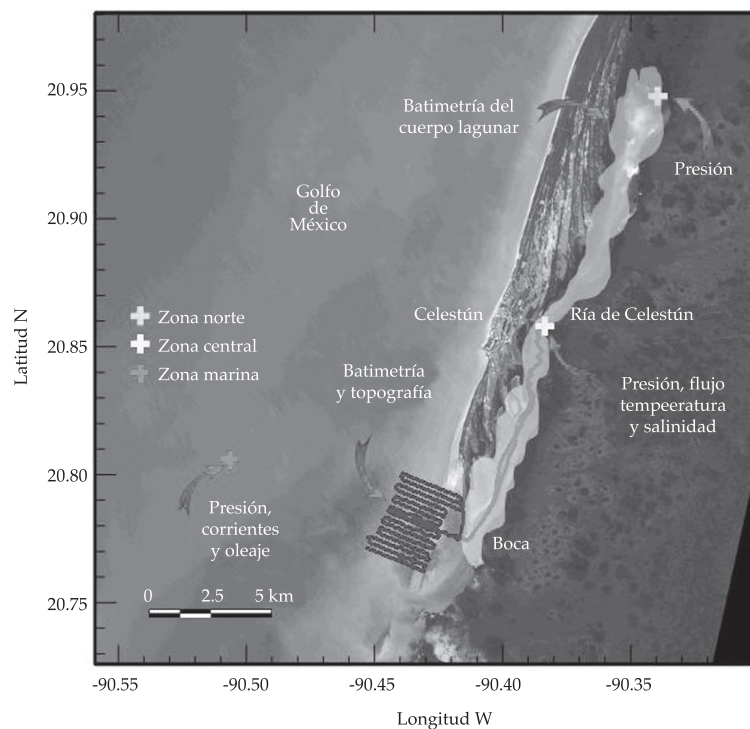


Figura 4. Área de estudio de la ría de Celestún, en la cual se indican los puntos en donde se colocaron los instrumentos, las variables medidas en cada uno de ellos y la zona donde se realizó la batimetría.

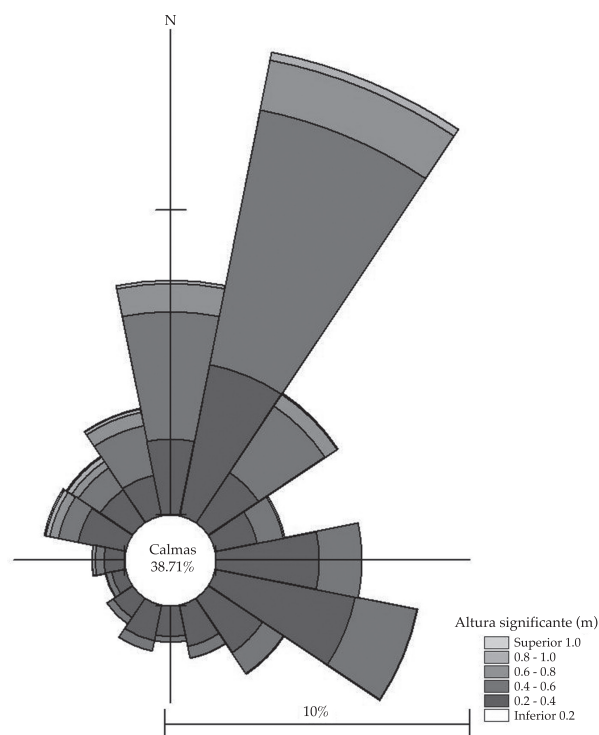


Figura 5. Rosa de oleaje de la serie medida en la zona marina de la ría (13/10/2008-28/10/2009).

La altura de ola significativa media por dirección para la época de huracanes osciló de 0.24 a 0.44 m, y la altura significativa máxima fue de 0.99 m, con dirección NNW. Para la época de nortes, las alturas medias fluctuaron de 0.38 m (SW-WSW) a 0.54 m (NW), y la máxima fue 1.15 m, proveniente del WNW. La media de los periodos pico registrados para cada dirección durante la época de huracanes fluctuó de 2.72 a 8.2 s, y de 4.79 a 16.41 s, para la época de nortes. El periodo pico máximo registrado fue de 25.6 s, en la época de huracanes.

La medición de corrientes se realizó de forma simultánea a la medición de marea medida en la zona marina, con intervalo de muestreo de 30 minutos en capas de 50 cm de espesor en toda la columna de agua. El comportamiento de la corriente fue uniforme a lo largo de la columna de agua; la dirección de la corriente resultó ser sensiblemente paralela a la orientación de la línea de costa de la ría de Celestún: hacia el NNE durante el flujo de marea y hacia el SSW

durante el reflujo. Las mayores velocidades están asociadas con la marea en reflujo, con una dirección SSW, un valor promedio de 0.09 m.s^{-1} , y máximos de 0.37 m.s^{-1} .

Simulaciones hidrodinámicas

La modelación numérica de la hidrodinámica del cuerpo lagunar comprendió en primer lugar la implementación y simulaciones de prueba (conservación de masa con marea monocromática), así como simulaciones utilizando datos medidos en campo para la calibración y validación, como se describió en la sección "Descripción y calibración del modelo numérico". Después se efectuaron simulaciones hidrodinámicas con una marea monocromática, con el fin de aislar los procesos de disipación y distorsión debidos a las características físicas del sistema (geometría, batimetría, zonas intermareales...), sin que éstos se vean contaminados u opacados por el

forzamiento de una marea real, la cual presenta inherentemente una señal distorsionada. La amplitud de dicha marea fue determinada a partir de un análisis estadístico de la marea viva presente en la señal medida en Celestún (0.76 m), y ajustada a un periodo diurno de 24 h. Las tres simulaciones principales correspondieron a la condición actual y a los escenarios de aumento del nivel del mar de 0.25 y 0.50 m (escenarios I y II, respectivamente).

Volúmenes y duraciones del flujo y reflujo en escenarios de aumento del nivel medio del mar

Se analizaron las condiciones de flujo y reflujo resultantes de las simulaciones hidrodinámicas para la condición actual y los escenarios de aumento del nivel del mar, calculando el prisma de marea, así como las duraciones de flujo y reflujo y las respectivas velocidades máximas en la boca (cuadro 4). Para un incremento del nmm de 25 cm, la capacidad de flujo y reflujo aumenta en un 53%, y para un aumento de 50 cm en un 114% (cuadro 4); en este último caso, el aumento del nmm corresponde aproximadamente a 1.3 veces la amplitud de marea considerada.

Las velocidades de corriente máximas alcanzadas en la boca para la onda de marea propagada sobre el escenario actual fueron de alrededor de 60 cm.s⁻¹ para ambas condiciones,

flujo y reflujo; dichas velocidades máximas aumentaron 18% en el escenario I, y 29% en el escenario II; ambas magnitudes con respecto al escenario actual. La figura 6 muestra las duraciones de flujos y reflujos para cada uno de los escenarios de incremento del nivel medio del mar.

A partir de los resultados presentados en el cuadro y figuras anteriores se deduce que:

- La ría de Celestún tiene un régimen hidrodinámico tal que la duración del reflujo es en todo momento mayor que la del flujo, pero las velocidades máximas en la boca son siempre mayores en el reflujo.
- Conforme aumenta el nivel medio del mar, el prisma de marea se incrementa también, primero con una tasa relativamente constante de $0.61 \times 10^6 \text{ m}^3$ entre los escenarios 0 y I (25 cm de aumento del nmm); después de eso, dicha tasa aumenta a 0.65, 0.69 y $0.73 \times 10^6 \text{ m}^3$ para los escenarios Ib (35 cm), Ic y II (50 cm), respectivamente. Lo anterior se debe de manera fundamental a que a partir de 35 cm de aumento del nmm se presenta un incremento más acelerado de la inundación en la zona de baja pendiente al oriente del cuerpo lagunar, y por lo tanto el volumen capturado en esa área hace que el prisma aumente con mayor rapidez que en los escenarios de menor aumento del nivel medio del mar.

Cuadro 4. Velocidades máximas, duraciones y volúmenes de flujo y reflujo para la condición actual y los escenarios de aumento del nivel medio del mar.

Condición	Gasto	Flujo		Reflujo		Diferencias		
	Prisma P (10^6 m^3)	$V_{\text{máx}}$ (m/s)	Duración (h)	$V_{\text{máx}}$ (m/s)	Duración (h)	ΔP ($10^6 \text{ m}^3/\text{cm}$)	ΔV (cm/s)	ΔD (h)
Escenario 0 (actual)	28.42	0.608	10.29	0.630	13.71	-	2.2	3.42
Escenario 0b (12.5 cm)	36.02	0.684	10.15	0.691	13.85	0.61	0.7	3.70
Escenario 0c (16.67 cm)	38.54	0.706	10.09	0.712	13.89	0.60	0.6	3.80
Escenario 0d (20.83 cm)	41.11	0.727	10.03	0.734	13.97	0.62	0.7	3.94
Escenario I (25 cm)	43.65	0.746	9.93	0.756	14.07	0.61	1.0	4.14
Escenario Ib (35 cm)	50.19	0.787	9.86	0.812	14.14	0.65	2.5	4.28
Escenario Ic (43 cm)	55.74	0.813	9.89	0.859	14.11	0.69	4.6	4.22
Escenario II (50 cm)	60.84	0.831	9.97	0.901	14.03	0.73	7.0	4.06

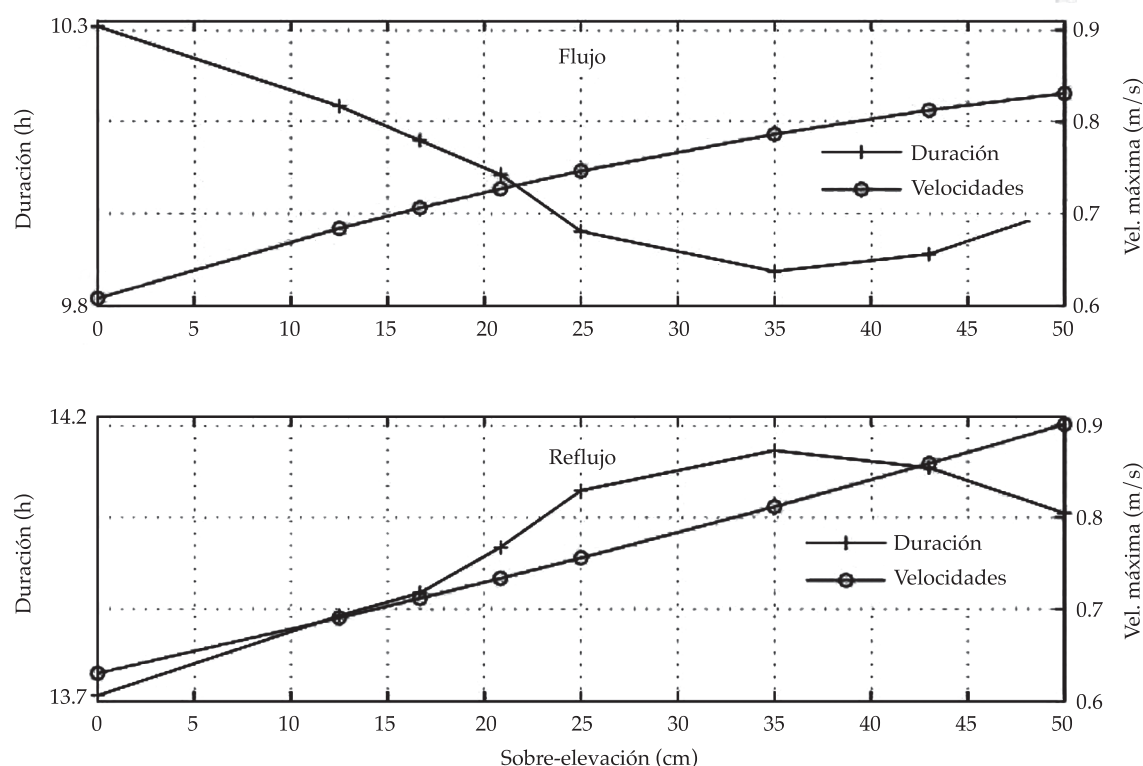


Figura 6. Duraciones de los flujos y reflujos en la ría de Celestún y velocidades máximas en la boca para cada uno de los escenarios de incremento del nivel medio del mar.

- Además, se aprecia que existe una tendencia de disminución (aumento) de la duración del flujo (reflujo) desde la condición actual hasta el Escenario 0d (35 cm, ver cuadro 4). Lo anterior se debe a que conforme aumentan las áreas de inundación, el reflujo o "vaciado" de esas áreas se retrasa, dada la alta fricción de dichas zonas. Sin embargo, esa tendencia se revierte en los siguientes escenarios; es decir, la duración del reflujo disminuye de modo paulatino a partir del incremento del nmm de 35 cm.
- En este caso, lo que probablemente sucede es que a partir de cierto nivel de superficie libre en la zona inundada, el reflujo se vuelve más eficiente debido a la poca altura de la vegetación en esa zona (en especial pastos marinos).
- No obstante lo anterior, la diferencia de velocidades máximas en la boca entre flujo

y reflujo del escenario 0 al escenario 0c disminuye (ΔV baja de 2.2 a 0.6 cm/s), para después aumentar de forma significativa en los siguientes escenarios, llegando a una diferencia máxima de 7 cm/s en el escenario II (50 cm).

En vista de lo expuesto, en términos de la velocidad máxima presentada en la boca y el transporte de sedimentos asociado, los resultados sugieren que, en primer lugar, hasta cierto valor de aumento del nmm (escenario 0c: 16.7 cm), la diferencia de velocidades máximas entre flujo y reflujo disminuye hasta hacerse prácticamente 0, lo cual se puede traducir en una menor capacidad del sistema de exportar sedimentos. Sin embargo, aumentos paulatinos del nmm indican un cambio de ese comportamiento, en el sentido de que la velocidad de reflujo aumenta en relación con la velocidad de flujo y, por ende, la

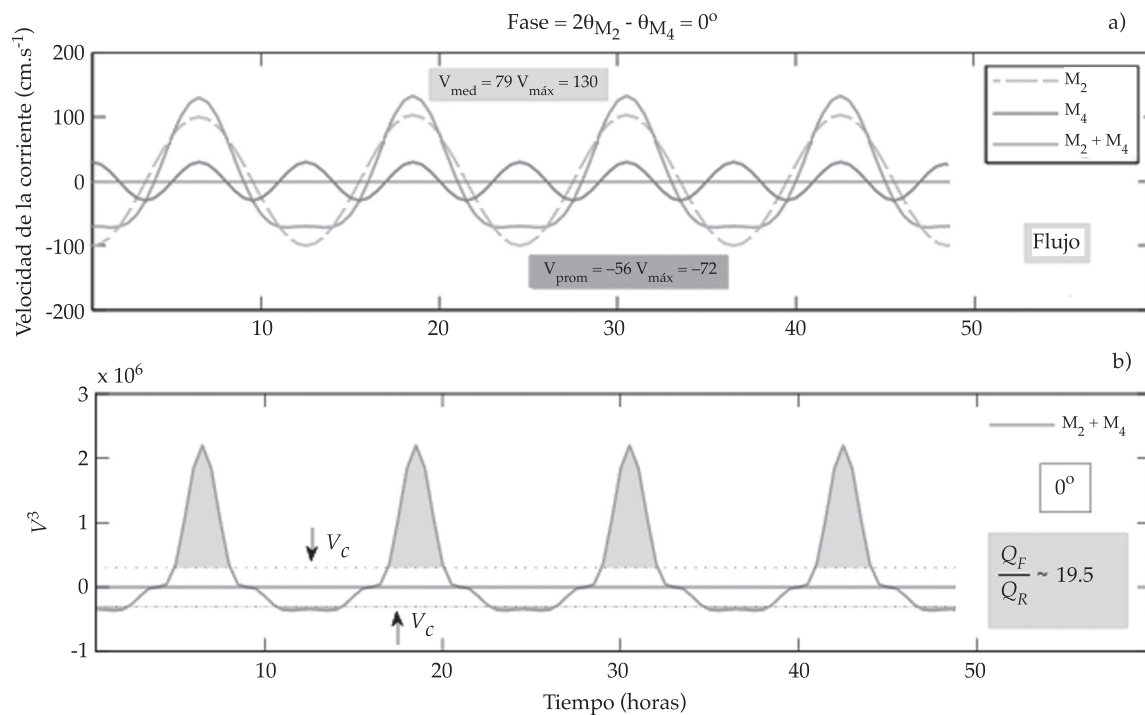


Figura 7. Ejemplo de asimetría de la velocidad de la onda de marea para un régimen con dominancia al flujo: a) armónico principal, M_2 , componente secundaria, M_4 , y desfase entre ellas; b) parámetro cualitativo de transporte de sedimentos, proporcional a la velocidad al cubo (obtenido de la simplificación de la ecuación de Meyer-Peter & Müller).

capacidad del sistema de expulsar sedimentos al mar (durante el refluo) es mayor que la de importar sedimentos (durante el flujo), lo cual puede verse como la capacidad del sistema de mantener el equilibrio y la boca abierta.

A fin de explicar este fenómeno, en la figura 7a se presenta un modelo simplificado para conocer la velocidad inducida por marea, la cual está compuesta por la superposición de dos señales monocromáticas (M_2 y su subarmónico M_4) y una fase nula entre ellas ($2M_2 - M_4 = 0$) de tal manera que la marea resultante es más corta e intensa durante el flujo; es decir, presenta una dominancia al flujo (ver, por ejemplo Speer & Aubrey, 1985), y se aprecia que las velocidades máximas alcanzadas durante el flujo son 1.8 veces las del refluo. En la figura 7b se muestra una aproximación del transporte de fondo, calculado como una simplificación de las ecuaciones de transporte

de Meyer-Peter y Müller (Speer & Aubrey, 1985), tomada como el cubo de la magnitud de velocidad de la corriente. También se presenta un valor arbitrario de la velocidad crítica (V_c) de iniciación del transporte y las zonas sombreadas representan la magnitud del transporte de sedimentos. Se aprecia que los valores positivos (potencial de importación de sedimento) son ampliamente superiores a los negativos (potencial de exportación de sedimento) y que una pequeña diferencia en la velocidad se traduce en una importante variación en el transporte. Para este régimen se ve cómo el transporte acarreado hacia el interior del sistema puede llegar a ser hasta 19.5 veces el sedimento acarreado hacia el exterior, lo que se puede traducir en un potencial azolve del sistema a largo plazo.

En el caso que nos ocupa, la ría de Celestún, el comportamiento es similar, sólo

que en este caso las velocidades mayores se presentan durante el reflujo. En la figura 8 se muestra la aproximación (V^3) de las tasas calculadas del transporte de sedimento para los tres experimentos: la condición actual y los escenarios I y II. Una subida del nmm genera un incremento en el prisma de marea, lo que conduce a un aumento en las magnitudes de las velocidades y en la capacidad de transporte de sedimento —tanto en flujo como en reflujo— en una cantidad de hasta el triple del acarreo actual. Dicha gráfica sugiere que un aumento del nivel medio del mar producirá una subida en las velocidades y transporte de sedimentos en la boca (hasta tres veces mayor que el actual), siendo que durante el reflujo la capacidad de transportar sedimento sería sobre dichos escenarios significativamente mayor que durante el flujo.

Conclusiones

Este trabajo consistió en estudiar el efecto del aumento del nivel medio del mar en la hidrodinámica de una laguna costera, especialmente en la boca de comunicación con el mar, y las posibles implicaciones en la morfología a mediano y largo plazos. A pesar de que este modelo simplificado de análisis de flujos y estimación cualitativa del posible transporte de sedimentos no toma en cuenta la disponibilidad del sedimento y el transporte litoral, ha sido probado como una herramienta útil para la estimación de las condiciones de equilibrio de cuerpos de aguas costeros. Las conclusiones más relevantes se presentan a continuación:

- El transporte de sedimento neto no depende sólo de la dirección de la corriente

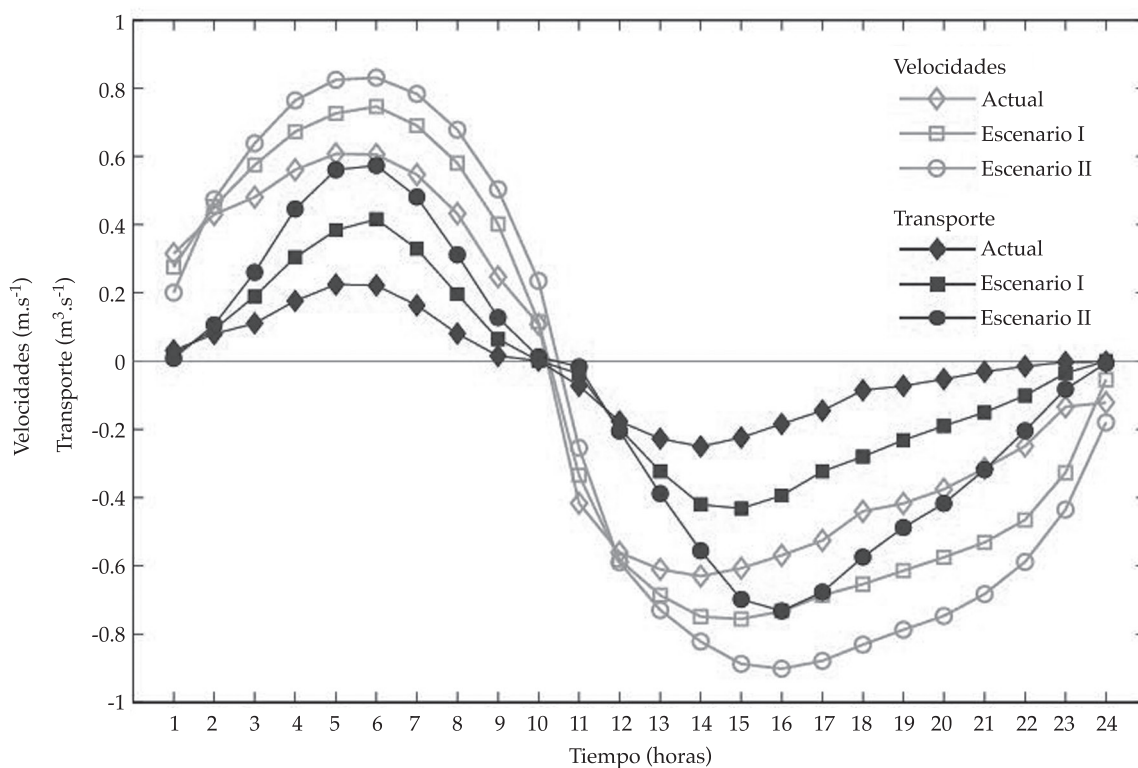


Figura 8. Velocidades y aproximación (V^3), transporte de sedimento en la boca lagunar durante el flujo y reflujo en un ciclo de marea en la ría de Celestún para los tres escenarios principales: actual, I y II. Valores negativos corresponden a reflujo.

residual, sino también de la distorsión de los campos de velocidades, así como de las velocidades máximas de flujo y reflujo.

- Las áreas intermareales no deben ser subestimadas debido a su implicación en la propagación y asimetría de la marea; las características morfológicas actuales que establecen el alcance de marea presente muestran una fuerte repercusión en los flujos en la boca; el aumento del nivel del mar conduce a que nuevas áreas sean cubiertas por la onda de marea y participen de manera activa en la dinámica lagunar, con implicaciones tanto físicas como biológicas a diferentes niveles y escalas espaciales y temporales.
- El sistema costero de Celestún cuenta con una capacidad adaptativa relativa ante un aumento del nivel medio del mar desde un punto de vista de la asimetría de la marea y de la capacidad de transporte de sedimento a través de su boca.
- En una primera etapa de un probable aumento del nivel medio del mar, la estabilidad del sistema se pone en riesgo por una disminución relativa de la capacidad de exportar sedimento durante el reflujo. Sin embargo, si el sistema lograra mantenerse abierto después de esa etapa, los resultados sugieren que los cambios en la distorsión de la marea debidos a la inundación de nuevas áreas adyacentes producirían una disminución de la duración del reflujo, acompañada por un aumento de las velocidades máximas en la boca en ese periodo de la marea.
- Lo anterior se traduce en una mejor capacidad de transportar sedimentos al exterior del sistema; es decir, una mejor capacidad de expulsar el sedimento que es importado durante la fase de flujo.
- Se pretende que la información generada en el presente estudio pueda formar parte de las bases de conocimiento científico para el manejo costero, y que sea utilizada por los tomadores de decisiones y creadores

de políticas ambientales, estableciendo que se debe crear un manejo de la zona costera basado en los cambios que pudieran generarse en un futuro que, si bien es incierto, puede valorarse de manera aproximada por medio de escenarios basados en probabilidades.

- De esta forma, conociendo las condiciones futuras del sistema costero y de sus componentes físicas se tendrán las bases para prever y/o mitigar las modificaciones en los espacios naturales, como los cuerpos lagunares, a fin de lograr un desarrollo natural en el espacio y tiempo de forma sustentable para los seres humanos, flora y fauna que habitan la costa y utilizan sus recursos.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero otorgado por la Coordinación de Estudios de Posgrado de la UNAM, el proyecto PAPIIT IN 120708 y el proyecto FOMIX-YUC106400.

Referencias

- Abernethy, R. B. (2000). *The New Weibull Handbook*. Fourth Edition. North Palm Beach, Florida: Published by the author.
- Appendini, C. M., A. Torres-Freyermuth, F. Oropeza, P. Salles, J. López, & E. T. Mendoza (2013). Wave modeling performance in the Gulf of Mexico and Western Caribbean: wind reanalyses assessment, *Applied Ocean Research*, 39, 20-30.
- Batllore, E., Chávez, E., Díaz de León, A., Herrera-Silveira, J., Garduño, M., González, A., & Torruco D. (1987). *Caracterización estructural de la laguna de Celestún*. Simposio Internacional del Mar, La Habana, Cuba.
- Batllore, E., Gonzáles, J., Díaz, J., & Febles, J. (2005). Caracterización hidrológica de la región costera noroccidental del estado de Yucatán, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 59, 74-92.
- Battjes, J. A. (2006). Developments in Coastal Engineering Research. *Coast. Eng.*, 53(11), 121-132.
- Botello, A., Villanueva, S., Gutiérrez, J., & Rojas, J. (Eds). (2010). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático* (514 pp.). Campeche, México: Gobierno

- del Estado de Tabasco, Semarnat-IINE, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche.
- Duch, J. (1988). *La conformación territorial del estado de Yucatán. Los componentes del medio físico*. México, DF: Universidad Autónoma Chapingo, Centro Regional de la Península de Yucatán.
- Houston, J. R., & Dean, R. G. (2011). Sea-Level Acceleration Based on U.S. Tide Gauges and Extensions of Previous Global-Gauge Analyses. *Journal of Coastal Research*, 27(3), 409-417.
- IPCC (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (104 pp.). Equipo de 1.7 Bibliografía 14 redacción principal: R. K. Pachauri & A. Reisinger (directores de la publicación). Ginebra: IPCC.
- Meyer-Peter, E. y Müller, R. (1948) Formulae for bedload transport. *Proceedings of 3rd Congress, International Association of Hydraulic Research, Sweden*, 39-64.
- Nakićenović, N., & Swart R. (Eds.) (2000). *Emissions Scenarios. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (599 pp.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Ortiz-Pérez, M. A., & Méndez-Linares, A. P. (1999). Escenarios de vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar en la costa mexicana del golfo de México y el mar Caribe. *Investigaciones Geográficas (Mx)*, 39, 68-81.
- Pugh, D., & Tides, T. (1987). *Surges and Mean Sea Level, a Handbook for Engineers and Scientists*. Chichester, UK: John Wiley & Sons.
- Salles, P., Voulgaris, G., & Aubrey, D. (2005). Contribution of Nonlinear Mechanisms in the Persistence of Multiple Tidal Inlet Systems. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 65, 475-491.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2000. *Programa de manejo Reserva de la Biosfera Ría Celestún*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México, D.F. 191 pp.
- Speer, P. E., & Aubrey, D. G. (1985). A Study of Non-Linear Tidal Propagation in Shallow Inlet/Estuarine Systems. Part II: Theory. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 21, 207-224.
- Torres-Mota, R., Salles, P., Mariño, I., & López, J. (July, 2012). Effects of Ocean Climate Change on the Celestún Estuary Morphology. *Proceedings. 33rd International Conference on Coastal Engineering (ICCE2012)*, ASCE, Spain.
- Yañez-Arancibia, A. (Ed.) (2010). *Impactos del cambio climático sobre la zona costera*. México, DF: Instituto de Ecología A.C. (INECOL), Texas Sea Grant Program, Instituto Nacional de Ecología (INE-Semarnat).
- Zavala-Hidalgo, J., De Buen-Kalman, R., Romero-Centeno, R., & Hernández-Maguey, F. (2010). Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas. En A. V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, & J. L. Rojas-Galaviz (Eds.). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático* (pp. 249-268). Campeche, México: Semarnat-INE, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche.

Dirección institucional de los autores

Dr. Rogelio Torres Mota

Dr. Paulo Salles Alfonso de Almeida

Dr. José López González

Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros
Unidad Académica Sisal del Instituto de Ingeniería de la UNAM
Puerto de Abrigo S/N, Sisal
97355, Yucatán, México
Teléfono +(52) (988) 9120 147 al 49, extensión 7403 y
(55) 5622 6710 al 17, extensión 7403
rogelio.torres03@cfe.gob.mx
psallesa@iingen.unam.mx
jlopezgo@ii.unam.mx



Haga clic aquí para escribir al autor

Transferencia de sedimentos de una microcuenca a la red de drenaje urbano

• Guillermo José Mendez* • Carlos Alberto Depettris • Jorge Víctor Pilar •
• Oscar Orfeo • Alejandro Ricardo Ruberto •
Universidad Nacional del Nordeste, Argentina

*Autor de correspondencia

Resumen

Mendez, G. J., Depettris, C. A., Pilar, J. V., Orfeo, O., & Ruberto, A. R. (septiembre-octubre, 2014). Transferencia de sedimentos de una microcuenca a la red de drenaje urbano. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(5), 21-37.

Los datos referentes a las tasas de generación y movilización de sedimentos en áreas urbanas son exiguos. Esto se debe a la complejidad del fenómeno y, especialmente, a su variabilidad. En este artículo se abordan tres aspectos: (1) la tasa anual de sedimento que genera una microcuenca durante tres años; (2) qué precipitaciones provocan mayores valores, y (3) cómo afectan las condiciones hidrológicas antecedentes de la cuenca en la carga de lavado de la escorrentía. Se monitoreó un microcuenca de la ciudad de Resistencia, Chaco, Argentina, de 4.76 ha y uso residencial, desde septiembre de 2009 hasta marzo de 2010. Se calibró un modelo hidrológico bajo el programa SWMM 5.0 y se trazaron curvas claves de sedimentos. Con esto y con las precipitaciones diarias de los años 2007/08; 2008/09 y 2009/10 se pudo obtener la carga anual de sedimentos transportados por la escorrentía urbana durante el periodo de análisis. Las cargas anuales de sedimentos transportadas oscilaron entre 0.8 y 1.40 t/ha. Los mayores valores se registraron en el periodo de septiembre a diciembre de cada año, en el que se transporta el 60% del total anual. Se concluye que existe una fuerte incidencia de los volúmenes de escurrimiento en las cargas de sedimentos, donde las áreas más impermeables son capaces de generar importantes caudales líquidos y, por tanto, mayores cargas de sedimentos que las zonas permeables. Los resultados obtenidos fueron coherentes con las mediciones, por tanto es factible cuantificar el aporte de sedimentos de cuencas urbanas al drenaje pluvial.

Palabras clave: sedimentos, drenaje urbano, cuencas de llanura.

Abstract

Mendez, G. J., Depettris, C. A., Pilar, J. V., Orfeo, O., & Ruberto, A. R. (September-October, 2014). *Sediment Transfer from a Microbasin to an Urban Drainage Network*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(5), 21-37.

Little data exists on sediment generation and transport rates in urban areas. This is due to the complexity of the phenomenon and, in particular, its variability. Three factors are investigated in this article: (1) annual sediment rate generated in a micro-basin over three years, (2) determination of the precipitations resulting in the highest values and (3) how prior hydrological conditions in the basin affect the sediment load in runoff. A basin in the city of Resistencia, in Chaco, Argentina, was monitored (4.76 ha with residential use) from September 2009 to March 2010. A hydrological model was calibrated with the SWMM program 5.0 and the primary sediment curves were drawn. With this and daily precipitation data for the years 2007/2008, 2008/2009 and 2009/2010 the annual sediment load transported by urban runoff was obtained for the analysis period. These ranged from 0.8 to 1.40 t/ha. The highest values documented occurred from September to December of each year, during which 60% of the load was transported. It is concluded that there is a strong incidence of volume runoff of sediment loads, where the most impermeable areas generate large flows and, therefore, higher sediment loads than permeable areas. The results obtained were consistent with the measurements and, therefore, quantification of sediments in pluvial drainage in urban basins is feasible.

Keywords: Sediments, urban drainage, plain basins.

Recibido: 19/12/11
Aprobado: 23/01/14

Introducción

La calidad del agua en áreas urbanas, en particular de los efluentes pluviales, es un tema

que ha ganado importancia en los últimos años. Esto se debe a dos motivos: a) las ciudades albergan el 50% de la población mundial y para mediados del siglo XXI se estima que alcanzará

el 70% (Niemcynowicz, 1996, *apud* Maksimovic, 2001); b) las actividades humanas generan gran cantidad de polución, que se deposita en la superficie de calles, veredas y techos de los edificios, y es lavada por la escorrentía urbana. Es por esto que el efluente pluvial presenta altas concentraciones de contaminantes.

En consecuencia, una porción cada vez mayor de la población está expuesta de manera periódica a aguas que generan un impacto visual negativo, degradación del cuerpo receptor, efectos acumulativos tóxicos sobre plantas y animales, y crecimiento de microorganismos indeseables.

En la República Argentina, como caso paradigmático, puede citarse el desarrollo del conurbano de la ciudad de Buenos Aires sobre la cuenca Matanza-Riachuelo. A lo largo de su historia se ha generado ocupación de áreas naturalmente inundables, crecimiento no controlado de superficies impermeables y falta de espacio para el manejo eficiente de las aguas pluviales. Los problemas de hoy se reflejan en múltiples aspectos, como afectación en la salud de la población, inundaciones frecuentes y pérdida del medio ambiente rico y diversificado, entre otros. Con la transformación de un ambiente rural a uno urbano, este tipo de problema se agrava cada vez más (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación Argentina, 2009). En la cuenca y en sus alrededores, donde se asientan casi cinco millones de personas, los problemas hídricos actuales pueden ser clasificados, por simplicidad, en aquellos asociados con la calidad del agua escurrida y con la cantidad del agua tanto superficial como subterránea.

Para alcanzar un desarrollo sustentable, los roles del drenaje urbano en el ámbito mundial han cambiado y ahora, además de proporcionar una protección frente a las inundaciones, debe permitir el control de contaminantes y otorgar al efluente pluvial características que contribuyan a un ambiente urbano ameno.

Los contaminantes presentes en las escorrentía urbana son los siguientes: sedimentos, sustancias que demandan oxígeno,

nutrientes (nitrato y fósforo), metales pesados, pesticidas, grasas y aceites, bacterias y virus, ácidos y bases, sustancias húmicas precursoras de trihalometanos, gases malolientes, cloruros y sodios, etc. (Jiménez-Gallardo, 1999).

Unos de los contaminantes más importantes son los sedimentos. Éstos, transportados por el drenaje urbano, generan depósitos que obstruyen los conductos del sistema mayor; aumentan la turbidez del agua; cambian el lecho del cuerpo receptor, reduciendo su capacidad de flujo y afectando la vida acuática de éste. Además, la fracción más fina de los sedimentos es susceptible de transportar contaminantes adsorbidos, como metales pesados, amonio, fertilizantes, pesticidas y policlorobifenilos (PCBs), entre otros (Porto, 2001). Es decir, que los problemas generados por los sedimentos no sólo atañen la calidad del agua sino que conllevan pérdidas de suelo y afectación del sistema de conductos del drenaje, por lo que el abordaje de su problemática exige un enfoque mixto, en donde intervienen, entre otras disciplinas, la sedimentología e hidrología.

Dada la complejidad del proceso de erosión urbana es difícil identificar las fuentes de generación de sedimentos. En efecto, el ambiente urbano crea una gran y compleja mezcla de sedimentos que pueden ser provenientes de las cercanías, o bien ser importados de áreas próximas o, inclusive, lejanas. Además, los materiales de construcciones civiles son fuentes importantes de sedimentos urbanos; estudios demostraron que altas concentraciones de calcio en lagos son debidas a este tipo de sedimento (Poletto, 2008). La escorrentía genera fuerzas que pueden provocar el arrastre de sedimentos acumulados en calles y zonas con suelo desprotegido y los transportan a los conductos del sistema menor del drenaje urbano.

Los datos referentes a las tasas de generación y movilización de sedimentos en áreas urbanas son exigüos. Este hecho no se debe sólo a la complejidad del fenómeno en sí, sino en especial a su variabilidad (Ramos, 1995). Usualmente

la carga de sedimentos está relacionada con el volumen de escorrentía que depende de forma directa de la impermeabilidad. Estudios realizados en los Estados Unidos, en zonas urbanas de 1 016 mm anuales de precipitación, indican que las cuencas comerciales presentan una carga de sedimento anual 2.28 veces superior a una cuenca residencial, esto se debe a que en ese país las zonas comerciales presentan áreas impermeables mayores a las residenciales (EPA, 1983).

La ciudad de Resistencia está ubicada en el nordeste argentino, es la capital de la provincia del Chaco y cuenta con una pobla-

ción de 386 391 habitantes (INDEC, 2010). En conjunto con las ciudades de Puerto Vilelas, Barranqueras y Fontana conforma lo que se denomina Área Metropolitana del Gran Resistencia (AMGR). El AMGR está emplazado en la megaplanicie de inundación del río Paraná, aguas abajo de la confluencia con el río Paraguay (figura 1).

El ejido del AMGR se encuentra en el interfluvio del río Negro por el norte y el riacho Arazá por el sur, ambos afluentes de margen derecha del río Paraná (figura 2).

El AMGR está emplazado en una zona influenciada por derrames y paleoderrames

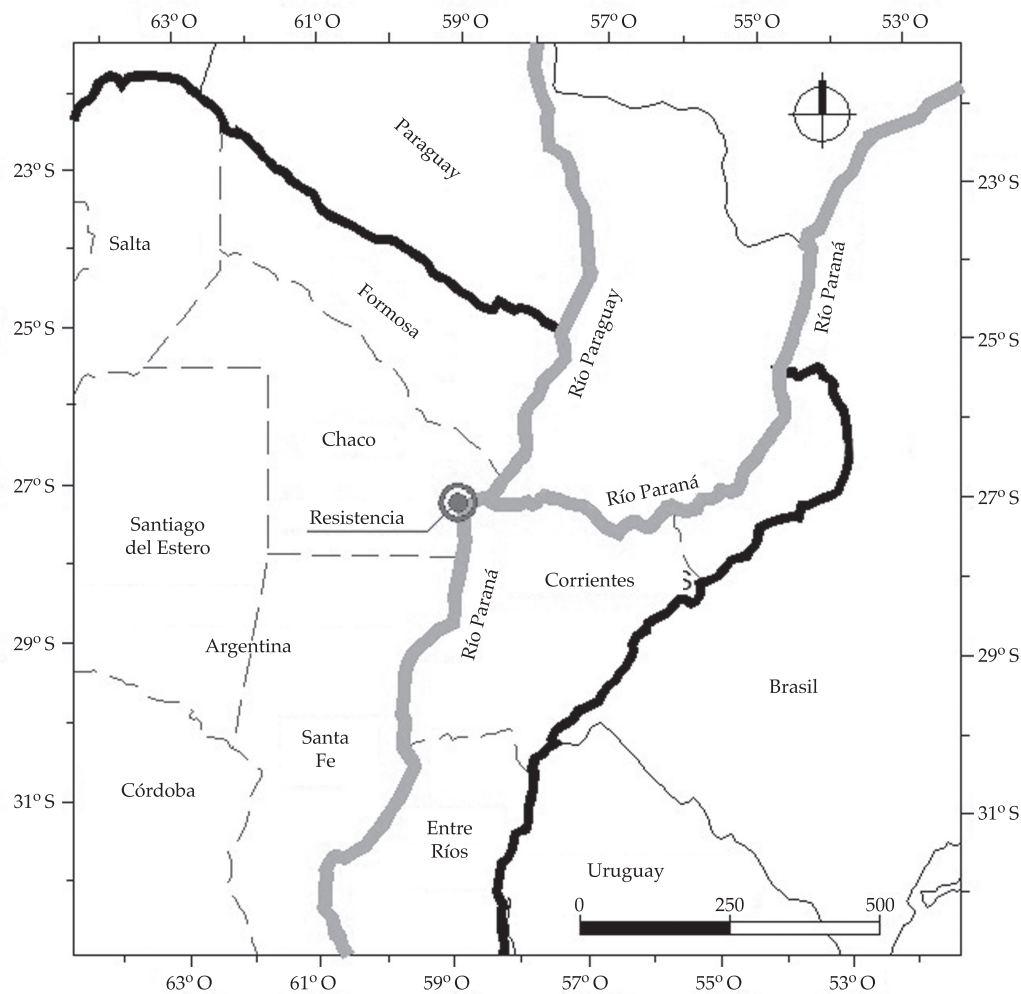


Figura 1. Ubicación de la ciudad de Resistencia en el nordeste de la República Argentina.

del río Paraná, lo cual determina la presencia de abundantes sedimentos fluviales tanto en superficie como en subsuelo. Los sedimentos superficiales (hasta 2 m) están compuestos básicamente por una alternancia de limos y arcillas parcialmente edafizadas, con arenas subordinadas y niveles de elevada plasticidad. Por debajo y hasta unos 5 m de profundidad se encuentran arenas limosas y limos arenosos, desagregados, saturados de humedad y muy fluidos (Mendez, 2013). En general, dichos materiales sedimentarios son reconocidos como depósitos aluviales, mencionándose también en los alrededores la presencia de limos y limos arenosos de origen eólico (Segemar, 1997). Desde el punto de vista edáfico, se reconoce el desarrollo de argiudoles sobre los depósitos aluviales, y de suelos natracuál en la zona dominada por depósitos eólicos (INTA, 1990).

Otra característica de los suelos que influye en la forma en que este aporta a la escorrentía urbana es la dispersión. La dispersión es un proceso por el cual un suelo deflocula espontáneamente cuando está expuesto al agua que

tenga poco o nada de velocidad hidráulica. Se piensa que la dispersión es causada por lo general por la repulsión electrostática entre las partículas de la arcilla, resultando en la formación de una suspensión coloidal estable del suelo (Garay-Porteros & Alva-Hurtado, 1999). Orfeo (1997) encontró una importante tendencia a la desagregación en presencia de agua, lo cual revela un factor potencial de riesgo de movilización de partículas y baja capacidad de sustentación que debe ser tenido en cuenta.

En este artículo se abordan tres aspectos importantes: (1) la tasa anual de sedimento que genera una microcuenca del sector sur de la ciudad de Resistencia durante los tres años que duró el presente estudio; (2) qué precipitaciones son las que generan mayores valores de carga de sedimento, y (3) cómo afectan las condiciones hidrológicas antecedentes de la cuenca en la carga de lavado del efluente pluvial.

Un mejor entendimiento de estos aspectos será un subsidio importante que ayudará a conocer la calidad de la escorrentía urbana y



Figura 2. Ubicación de la cuenca de Avenida Las Heras.

propiciará un mejor diseño de sistemas de drenaje en áreas de llanura.

Este estudio fue realizado por el grupo de investigación del Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), con la colaboración de investigadores del Centro de Ecología del Litoral (Cecoal), del Conicet, en el marco del proyecto de “Hidrología Urbana del Nordeste Argentino”, financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) de la República Argentina.

Área de estudio

Se adoptó como área de estudio la microcuenca que descarga a los sumideros ubicados en la calle San Lorenzo de la ciudad de Resistencia, Chaco, aguas arriba de su intersección con la Avenida Castelli (figuras 2 y 3). La elección de

la misma respondió a una serie de factores (Depettris, Depettris, Kutnich, & Ruberto, 2009): a) presenta facilidad de acceso y supervisión; b) constituye un área de aporte cerrada; c) permite mediciones de flujo en calzada; d) presenta reducido estacionamiento de vehículos sobre la zona de medición, y e) las bocas de tormenta son representativas de las usadas en la región y están ubicadas en tramos rectos.

Esta microcuenca presenta un uso de tipo residencial y pertenece a la cuenca de la Avenida Las Heras. Esta última tiene una superficie total de 119 ha, presenta pendiente muy baja (menor al 0.1%) y descarga mediante conductos cerrados y abiertos al canal de Avenida Soberanía Nacional (figura 2), emisario receptor y conductor de todas las descargas de dicho sector de la ciudad (CFI-AFIN, 1995).

Los sumideros a los que aporta la cuenca de estudio están ubicados sobre las márgenes derecha e izquierda de la calle San Lorenzo. Considerando al eje de dicha calle como



Figura 3. Microcuenca de los sumideros de la calle San Lorenzo y Avenida Castelli. Referencias: 1) suelo descubierto; 2) torre en construcción; 3) sitios de muestreo (aguas arriba de las bocas de tormenta).

divisoria de aguas, puede asumirse que a esos sumideros descargan dos cuencas diferenciadas. La cuenca de la margen izquierda, en la que se construyeron tres edificios en torre durante la etapa de recolección de datos de campo (figura 3), presenta menor porcentaje de superficie impermeable que la opuesta (cuadro 1; Depettris et al., 2009).

Materiales y métodos

Periodo de análisis

El periodo de análisis correspondió a los años hidrológicos 2007/08, 2008/09 y 2009/10. En la región, los años hidrológicos se inician en el mes de septiembre y finalizan en el mes de agosto del año calendario siguiente (Bruniard, 1981). La ciudad de Resistencia presenta una precipitación anual media de 1 350 mm (APA-AFIN, 2001), en tanto que la precipitación máxima diaria anual media es de 116.8 mm (Mendez, Ruberto, & Pilar, 2009). Los dos primeros años de análisis coincidieron con un periodo seco, con precipitaciones anuales por debajo de la media (cuadro 2), en tanto que en el último año esta situación se revirtió a partir de noviembre de 2010, cuando precipitaron 351 mm en siete días, evento que se estima tiene

un tiempo de recurrencia de 20 años (Mendez, Ruberto, Pilar, & Depettris, 2011).

Determinación de caudales líquidos

La determinación de los caudales líquidos se realizó mediante un modelo de transformación lluvia-escorrentía, utilizando el programa SWMM (*Stormwater Management Model*), versión 5.0, de la EPA (Environmental Protection Agency) de los Estados Unidos.

El SWMM se puede utilizar para un único evento de precipitación o para realizar una simulación continua en un periodo extendido. El programa permite simular tanto la cantidad como la calidad del agua evacuada, en especial en drenaje urbano (Huber & Dickinson, 1988).

Se realizó una modelación continua durante los tres años hidrológicos del periodo de análisis. Se utilizaron datos de precipitación registrados cada 15 minutos y de evaporación diaria. Los datos de precipitación del año 2009/10 son los registrados por el pluviógrafo de la Administración Provincial del Agua (Chaco-Argentina), instalado en cercanías de la laguna "Los Lirios", ubicada a unos 2 km al este de la microcuenca estudiada. La estación "Los Lirios" presenta registros incompletos durante los años 2007/08 y 2008/09, por lo que se utilizaron los datos del pluviógrafo del

Cuadro 1. Distribución de áreas de la microcuenca de estudio.

Concepto	Margen derecha		Margen izquierda		Total	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Área permeable	0.293	14	0.464	17	0.757	16
Área impermeable	1.7290	86	2.2780	83	4.007	84
Área total	2.02	100	2.74	100	4.764	100

Cuadro 2. Precipitaciones anuales y máximas diarias anuales del periodo de análisis y sus correspondientes tiempos de recurrencia de excedencia.

Año	Panual (mm)	Tiempo de recurrencia (años)	Pmáx (mm)	Fecha	Tiempo de recurrencia (años)
2007/2008	870	0.9	82.5	27/12/2007	1.2
2008/2009	935	0.9	86.5	05/02/2009	1.3
2009/2010	1 347.3	2.3	155	19/01/2010	6.6

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) en Colonia Benítez, ubicado a 15 km al norte de la microcuenca. Los datos de evaporación fueron los registrados en el tanque de la Estación Meteorológica de Capacitación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), ubicada a 300 m de la microcuenca.

Se dividió al área de estudio en 18 subcuencas que aportan a las respectivas calles, consideradas como conductos de sección irregular (figura 4). Como se analizaron por separado las cuencas de margen izquierda y las de margen derecha, se consideró a la calle San Lorenzo como si fuese dos conductos seccionados a partir de su eje central.

Para la calibración de los parámetros se utilizaron cinco aforos, correspondientes a las preci-

pitaciones de los días 14/10/2009, 06/11/2009, 20/11/2009, 08/02/2010 y 22/02/2010, detalladas por Mendez, Depettris, Orfeo, Ruberto, & Pilar (2010). Para realizar los aforos de caudales se utilizaron las escalas hidrométricas materializadas sobre la calzada a los efectos de este estudio (Depettris *et al.*, 2009). La conversión del ancho mojado en la sección de control a caudales se realizó a través de la fórmula de Manning, adoptando 0.013 como valor de rugosidad para el hormigón (Chow, 1983).

Tanto el aforo de caudales como la recolección de muestras, descrita más adelante, se realizaron en las márgenes izquierda y derecha de la calle San Lorenzo (figura 5). Esta disquisición permitió estudiar el comportamiento de ambas áreas de aporte en forma separada y realizar un análisis comparativo.

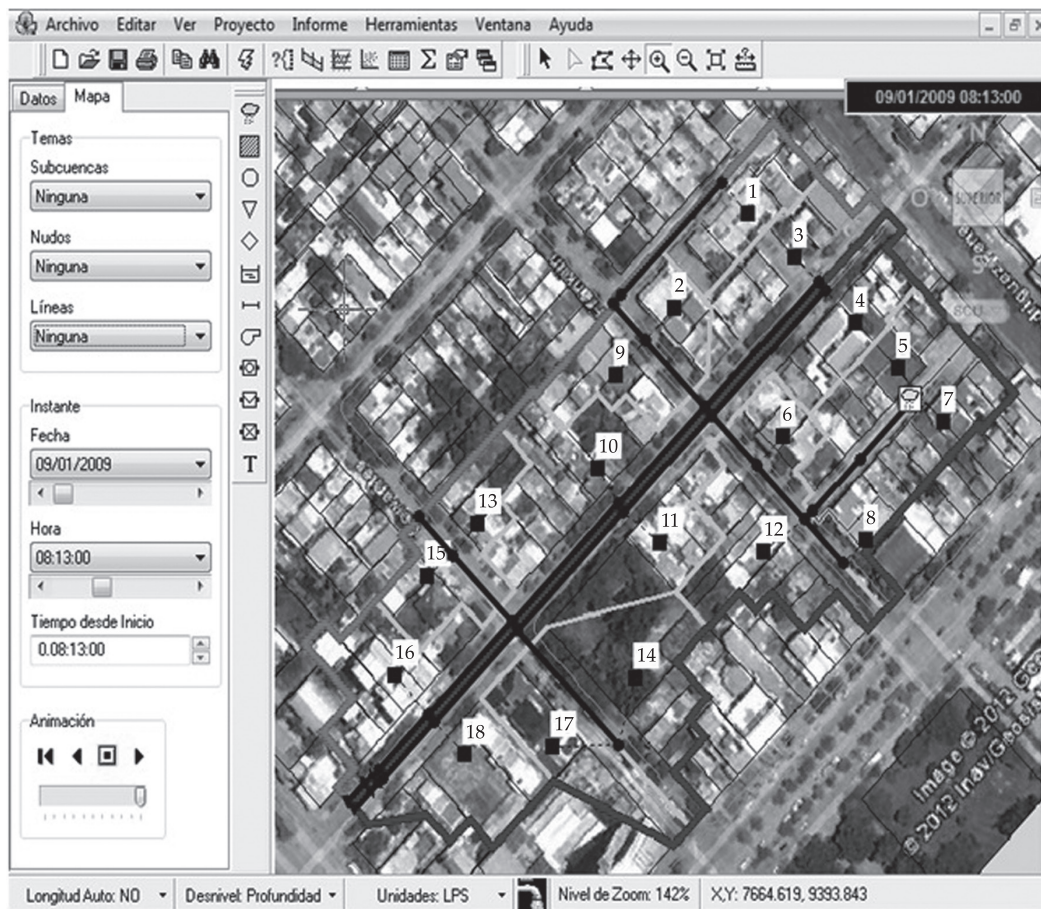


Figura 4. Modelo utilizado para analizar la microcuenca de la calle San Lorenzo.

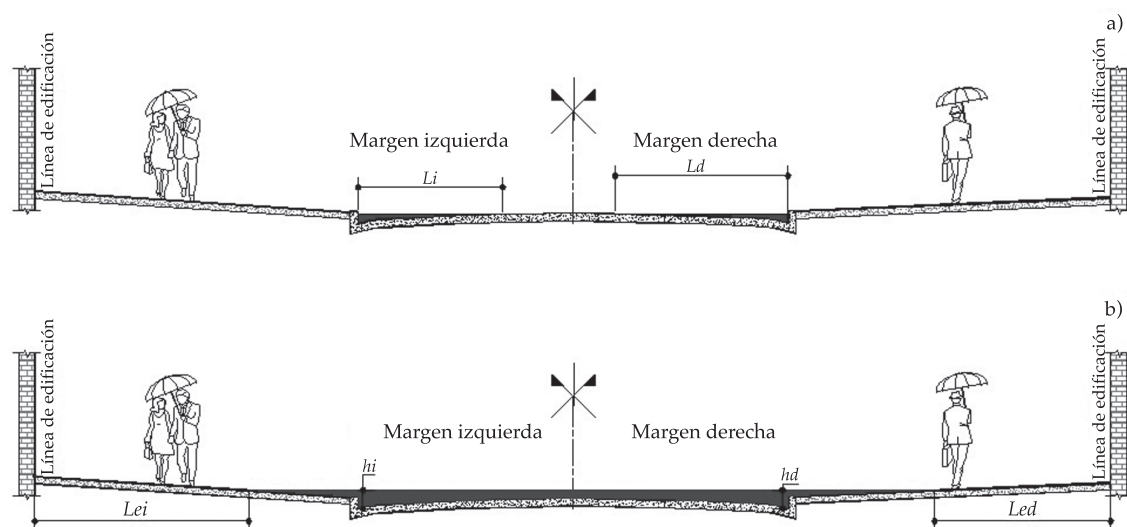


Figura 5. Mediciones realizadas en la calle San Lorenzo: a) cuando la escorrentía está contenida en las cunetas, b) cuando la escorrentía desborda las cunetas.

Se logró un ajuste adecuado del modelo para caudales extremos, tal es el caso de la precipitación del 20/11/2009. El ajuste de ese evento (figura 6) se realizó considerando ambas cuencas trabajando en conjunto, teniendo en cuenta que durante el mismo se registraron tirantes de agua que superaron el parteaguas de la calle San Lorenzo.

Para caudales bajos, el modelo arrojó valores menores que los aforados, tal es el caso de la precipitación del 08/02/2010 (figuras 7 y 8). Es importante indicar que la metodología utilizada para la medición de los caudales líquidos es imprecisa para caudales menores a 10 l/s, en especial por la variabilidad que presenta el ancho de escurrimiento en una sección con muy bajos tirantes y flujo marcadamente subcrítico.

Determinación de la carga de sedimentos

La carga de sedimentos transportada en cada precipitación se obtuvo mediante dos curvas de regresión: una correspondiente a la cuenca de margen izquierdo y la otra a la de margen derecho. Las variables predictoras utilizadas

fueron el caudal líquido del escurrimiento y la precipitación antecedente de 42 días al evento.

La utilización de estas variables se justifica en que la remoción de contaminantes en una cuenca urbana depende del volumen de escorrentía directa, o sea, de la precipitación efectiva. Por ello, la cantidad de contaminantes posibles de ser transportados en una lluvia depende de los escurrimientos generados de manera precedente. Dada la dificultad en obtener la precipitación efectiva y considerando que las variables predictivas deben ser fácilmente medibles, se optó por utilizar la precipitación total antecedente, que está directamente relacionada con la primera.

Además, para la microcuenca de estudio, se encontró una buena correlación entre la precipitación antecedente de 42 días con el CME de los eventos medidos (figura 9).

La concentración media del evento puede ser obtenida utilizando la ecuación (1) (Novotny, 1992):

$$CME = \frac{\sum Qi \cdot Ci}{\sum Qi} \quad (1)$$

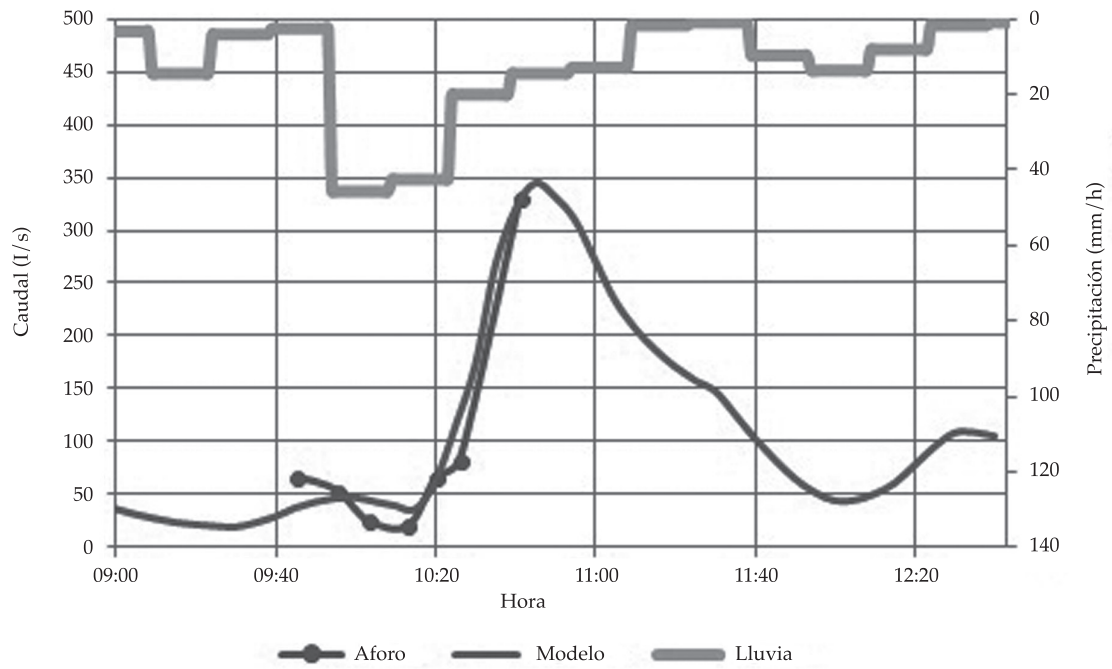


Figura 6. Hietograma e hidrogramas del evento del 20/11/2009.

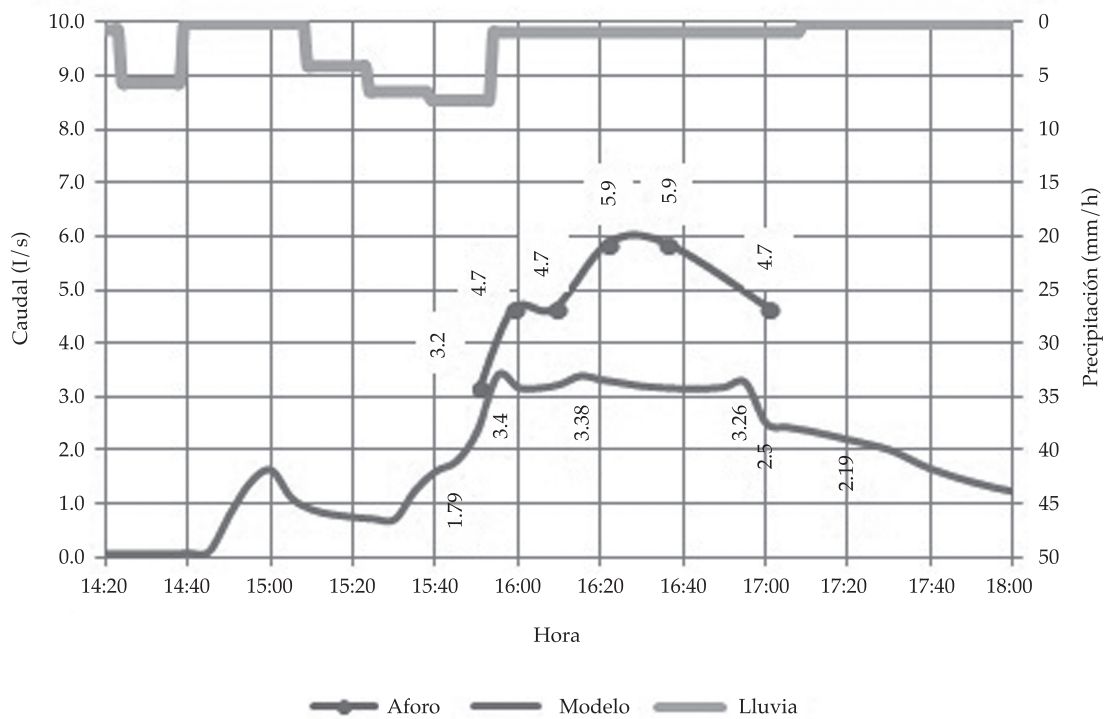


Figura 7. Hietogramas e hidrogramas de la cuenca del margen derecho del evento del 08/02/2010.

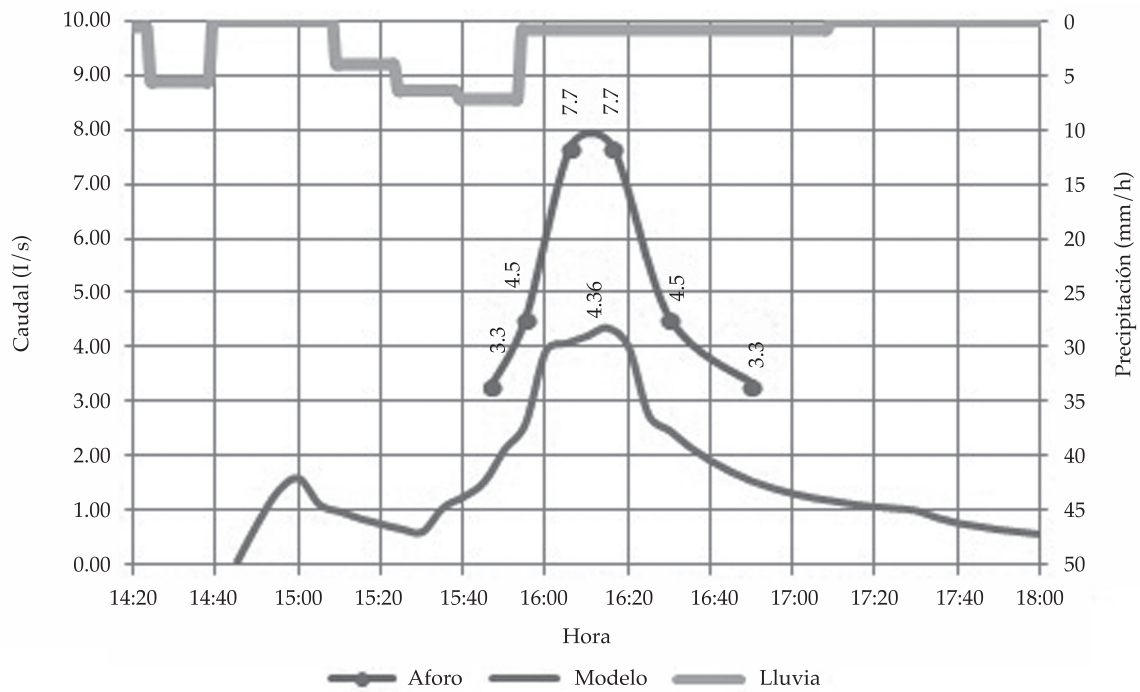


Figura 8. Hietogramas e hidrogramas de la cuenca del margen izquierdo del evento del 08/02/2010.

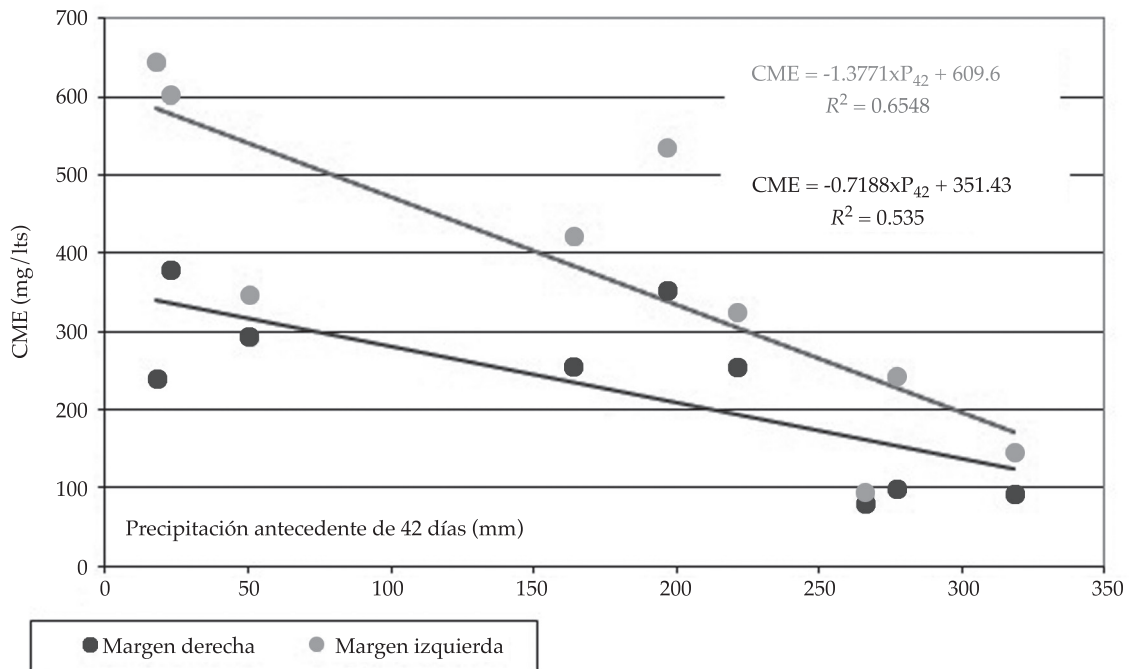


Figura 9. Variación del CME con respecto a la precipitación antecedente de los últimos 42 días.

siendo:

CME: concentración media del evento.

Q_i : caudal líquido.

C_i : concentración de sólidos suspendidos.

Se consideró que la relación lineal entre el caudal líquido y el sólido representa de modo razonable la correlación de valores, lo que coincide con lo presentado por Vanoni, 1975 (*apud* Huber y Dickinson, 1988).

El ajuste de las curvas de regresión se realizó a partir de 89 muestras del agua de escorrentía en la calzada, que fueron analizadas en laboratorio para la determinación de la concentración de sólidos suspendidos.

La recolección de muestras se realizó de forma manual mediante el captador DH3, que fue desarrollado en específico para el monitoreo de las aguas pluviales urbanas por el Grupo de Investigación del Departamento de Hidráulica

de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste. Se colocó el muestrador con las válvulas abiertas, a fin de que ni éste ni su operador interfiriesen el flujo. Llegado el momento, se cerraron instantáneamente las válvulas y se volcó el contenido en recipientes plásticos (figura 10).

Las muestras obtenidas en campo fueron procesadas en laboratorio para determinar la concentración total de sedimentos en suspensión. Para ello se filtraron 50 ml de cada muestra mediante discos deshidratados y pre-pesados de acetato de celulosa de 0.45 μm de porosidad, empleando bomba de vacío. Después del filtrado, los discos fueron llevados a estufa termostatzada a 105 °C durante una hora y después se trasladaron a desecador hasta peso constante. Finalmente, los filtros fueron pesados en balanza analítica de precisión ($\pm 1 \times 10^{-4}$ g). Por diferencia de peso se obtuvo la cantidad de material retenido y el cálculo de concentración fue referido a 1 litro.



Figura 10. Recolección de muestras mediante captador DH3.

La descarga sólida se obtuvo relacionando el caudal líquido y la concentración de sólidos suspendidos (Mendez *et al.*, 2010). Se trazaron las curvas de regresión para las cuencas de margen izquierdo y derecho (ecuaciones (2) y (3), respectivamente):

$$Q_s = 2.62 + 0.325 \cdot Q - 0.0163 \cdot P_{A42d} \quad (2)$$

$$Q_s = 1.53 + 0.277 \cdot Q - 0.00758 \cdot P_{A42d} \quad (3)$$

en las que:

Q_s : carga de sedimento (g/l).

Q : caudal líquido (l/s).

P_{A42d} : precipitación antecedente de 42 días (mm).

El ajuste mostrado por las ecuaciones (2) y (3) fue aceptable (R^2 igual a 95.5% y 99.1%, respectivamente) y el valor de "p" de las distintas variables explicativas indica que

éstas son significativas para un intervalo de confianza del 95%, según los datos disponibles.

En las figuras 11 y 12 se ilustran en línea continua las curvas de regresión trazadas para distinta precipitaciones antecedentes de 42 días, para las cuencas de margen derecha e izquierda, respectivamente, en tanto que los puntos indican los valores obtenidos de los eventos medidos.

Se consideran válidas las ecuaciones planteadas para valores de caudal líquido mayores a 1 l/s; para caudales menores, la carga de sedimentos es prácticamente despreciable.

Resultados

Tasa anual de sedimentos

Con los datos de precipitaciones y de evaporación se obtuvieron los caudales líquidos generados por la microcuenca para los años 2007/08, 2008/09 y 2009/10. Posteriormente se determinó, a partir de las curvas de regresión

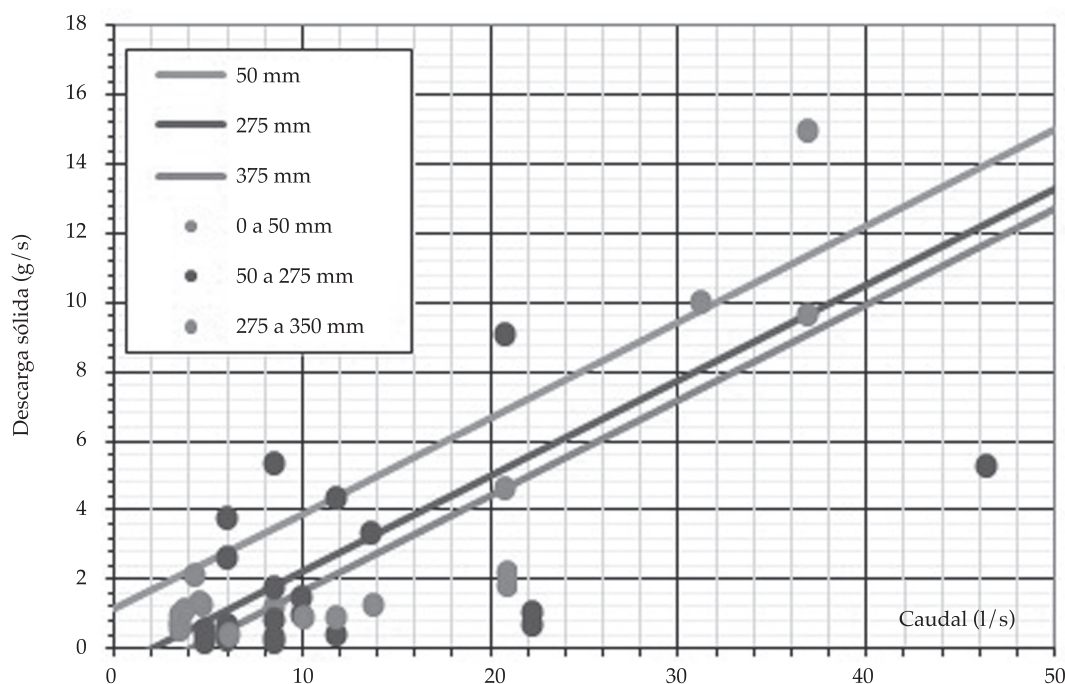


Figura 11. Curvas de regresión de margen derecha.

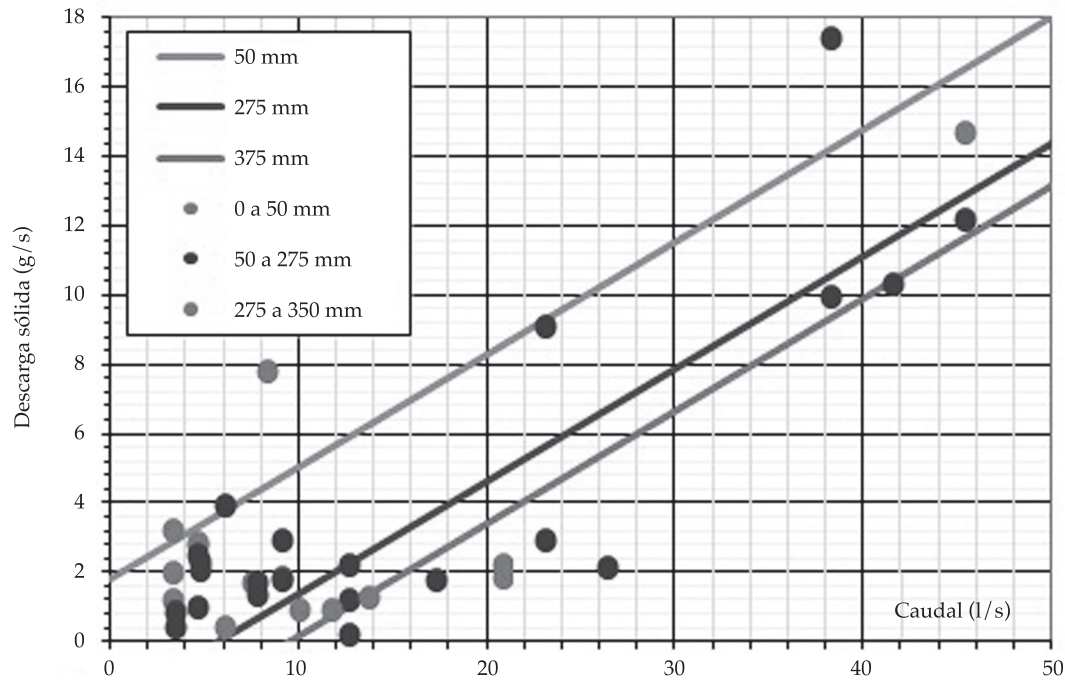


Figura 12. Curvas de regresión de margen izquierdo.

(ecuaciones (2) y (3)), la carga de sedimentos (caudal sólido) transportados por la escorrentía urbana para todo el horizonte de análisis (figuras 13, 14 y 15).

Los resultados de la modelación indican que las cargas anuales de sedimentos transportadas por la escorrentía superficial de la cuenca de margen izquierdo han sido superiores a las del margen derecho. Sin embargo, las tasas de sedimentos anuales, que relacionan la carga de sedimentos con el área de aporte, indican valores levemente superiores de la cuenca del margen derecho respecto del izquierdo para los tres años de análisis (cuadro 3). Por esto se concluye que existe una fuerte incidencia de los volúmenes de escurrimiento en las cargas anuales de sedimentos, donde las áreas más impermeables son capaces de generar importantes caudales líquidos y, por tanto, mayores cargas de sedimentos que las zonas permeables.

Condiciones antecedentes

De la observación de las figuras 13, 14 y 15 es posible constatar que las mayores cargas de sedimento se registran en el periodo de septiembre a diciembre de cada año. En efecto, en estos meses se inicia el periodo húmedo, por lo que se presentan dos condicionantes que propician la generación y el transporte de sedimentos: el escurrimiento de caudales líquidos altos y precipitaciones antecedentes escasas. En la figura 16 se indica la precipitación acumulada por cuatrimestre en el periodo de análisis.

Por lo expuesto, en los meses de septiembre a diciembre se produce el lavado de la cuenca, generando el 60% del sedimento transportado en el año (cuadro 4).

Conclusiones y recomendaciones

Se han obtenidos resultados de la carga sólida de sedimentos a lo largo de los años

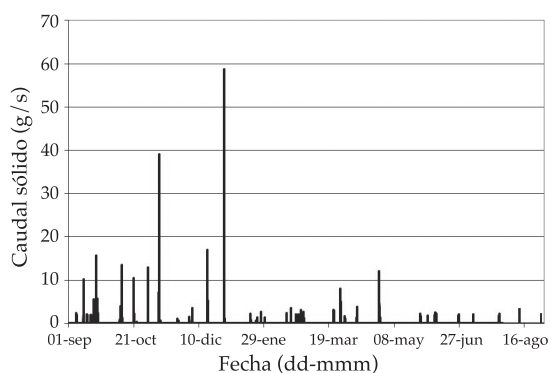


Figura 13a. Caudales sólidos, margen derecha, 2007/08.

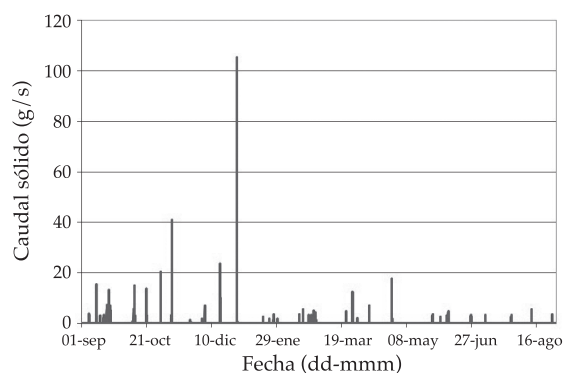


Figura 13b. Caudales sólidos, margen izquierda, 2007/08.

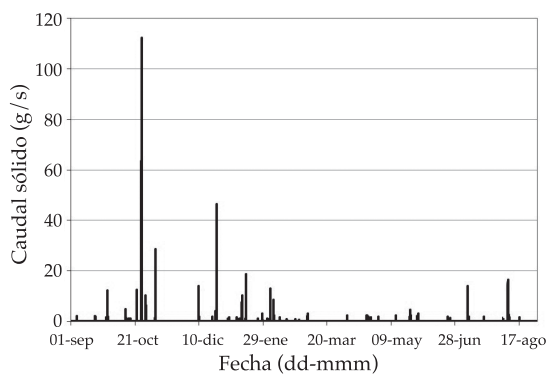


Figura 14a. Caudales sólidos, margen derecha, 2008/09.

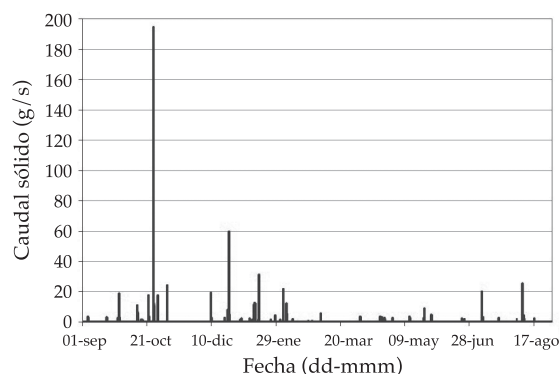


Figura 14b. Caudales sólidos, margen izquierda, 2008/09.

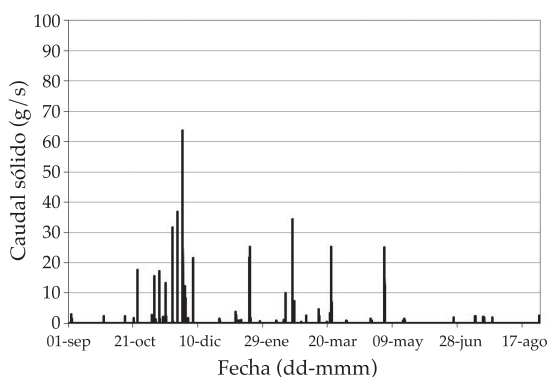


Figura 15a. Caudales sólidos, margen derecha, 2009/10.

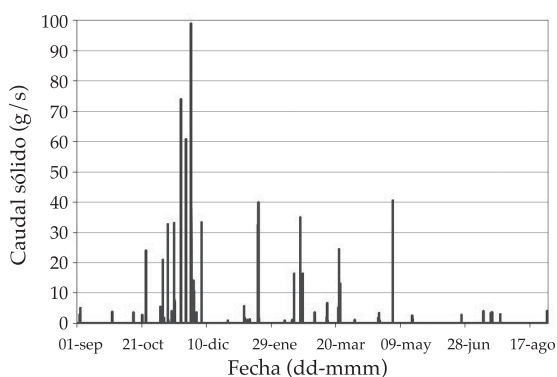


Figura 15b. Caudales sólidos, margen izquierda, 2009/10.

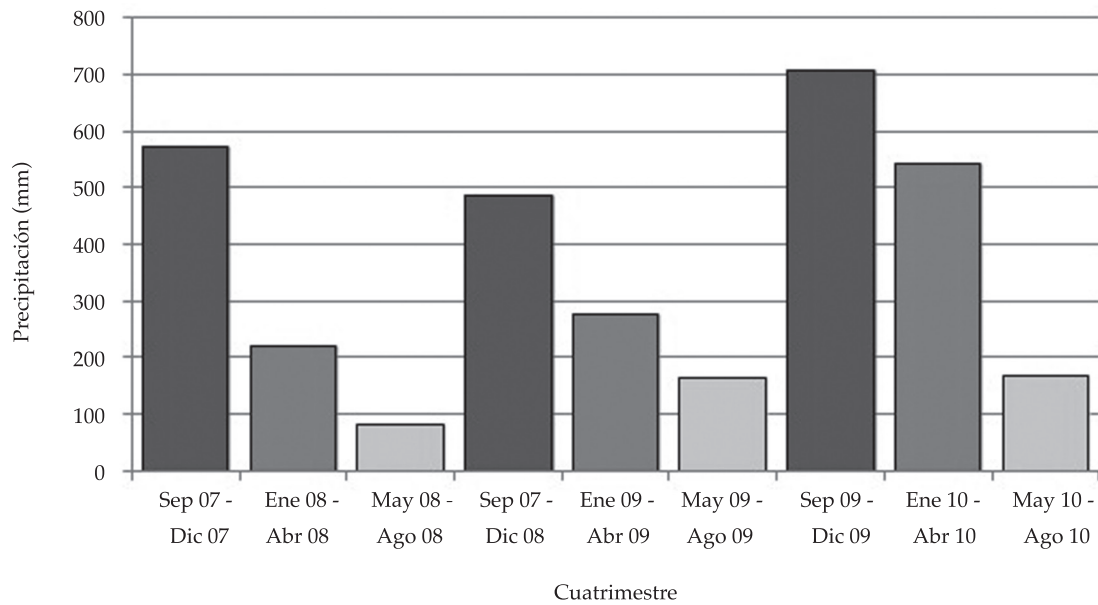


Figura 16. Precipitación acumulada por cuatrimestre.

Cuadro 3. Carga de sedimentos anuales.

Margen	Área (ha)	Área permeable (%)	Carga de sedimentos anual			Tasa de sedimentos		
			2007/08 (t)	2008/09 (t)	2009/10 (t)	2007/08 (t/ha)	2008/09 (t/ha)	2009/10 (t/ha)
Derecha	2.02	14	1.75	2.26	2.98	0.86	1.12	1.47
Izquierda	2.74	17	2.16	2.98	4.17	0.73	1.01	1.41
Total	4.76	16	3.91	5.24	7.16	0.78	1.05	1.43

Cuadro 4. Porcentaje de sedimento transportado desde septiembre hasta diciembre.

Año	Derecho	Izquierdo
2007/08	62%	66%
2008/09	58%	60%
2009/10	58%	55%

hidrológicos 2007/08, 2008/09 y 2009/10 para una microcuenca del sector sur de Resistencia, utilizando el modelo SWMM y curvas de regresión de la relación entre la descarga líquida y la sólida. Ante las deficiencias del modelo hidrológico para predecir caudales originados por precipitaciones de baja intensidad (meno-

res a 7.5 mm/h), se observaron diferencias entre los resultados de caudal sólido obtenidos mediante la metodología detallada y los datos medidos ante tales eventos. Estos últimos, si bien son frecuentes, no tienen incidencia en los resultados de las cargas anuales de sedimentos; en efecto, de los resultados de la modelación planteada, las cargas de sedimentos generadas ante lluvias de intensidades bajas comprenderían un 14 a 5% de la carga anual. Esto indica que la imprecisión en tales eventos no es relevante.

Cabe destacar que la metodología planteada se ajustó a condiciones de uso residencial de la microcuenca, sin considerarse alteraciones

en el uso del suelo producidas durante la construcción de obras civiles.

Las cargas anuales de sedimentos transportadas por la escorrentía superficial de la cuenca de margen derecho oscilaron entre 1.75 y 2.26 t, en tanto que para la cuenca de margen izquierdo, los resultados mostraron valores que van de 2.16 a 4.17 toneladas. Las tasas de sedimentos anuales de ambas cuencas, que relacionan la carga de sedimentos con el área de aporte, son similares para los tres años de análisis, presentando valores que van de 0.8 a 1.40 t/ha.

Se concluye que podría existir incidencia de los volúmenes de escurrimiento en las cargas anuales de sedimentos donde las áreas más impermeables son capaces de generar importantes caudales líquidos y por tanto mayores cargas de sedimentos que las zonas permeables.

Las mayores cargas de sedimento se registraron en el periodo de septiembre a diciembre de cada año, periodo en el que se transporta el 60% del total anual. Se destaca que un solo evento puede transportar, por el escurrimiento superficial, más del 20% del sedimento transportado en todo el año.

Referencias

- APA-AFIN (2001). *Línea de ribera de lagunas ubicadas en el sistema Hídrico del río Negro*. Informe final. Administración Provincial del Agua (APA)-Asociación de Apoyo a la Facultad de Ingeniería UNNE (AFIN). Resistencia (Chaco), Argentina.
- Bruniard, E. D. (1981). *El clima de las planicies del norte argentino (Ensayo metodológico de geografía de los climas)*. Tesis de Doctorado en Geografía. Facultad de Humanidades de la Universidad Nacional del Nordeste. Resistencia (Chaco), Argentina.
- Chow, V. T. (1983). *Hidráulica de canales abiertos* (584 pp.). México, DF: Editorial Diana.
- CFI-AFIN (1995). *Estudio de los desagues pluviales del sector sur de Resistencia*. Argentina: Consejo Federal de Inversiones, Asociación de Apoyo a la Facultad de Ingeniería de la UNNE. Resistencia (Chaco), Argentina.
- Depettris, C. A., Kutnich, E. J., & Ruberto, A. R. (2009). *Hidrología urbana: instrumentación y evaluación del escurrimiento superficial en una microcuenca de Resistencia*. Congreso Nacional del Agua, Trelew (Chubut), Argentina.
- EPA (1983). *Results of the Nationwide Urban Runoff Program* (pp. 6-64). Vol. I. Environmental Protection Agency. Washington D.C.
- Garay-Porteros, H., & Alva-Hurtado, J. E. (1999). *Identificación y ensayo de suelos dispersivos*. XII Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Lima, Perú.
- Huber, W. C., & Dickinson, R. E. (1988). *Stormwater management model Version 4. User's Manual*. (313 pp.). Athens (GA), USA: EPA-600/3-88-001a.
- INTA (1990). *Atlas de suelos de la República Argentina*. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Secretaría de Industria, Ganadería y Producción.
- Jiménez-Gallardo, B. R. (1999). *Contaminación por escorrentía urbana* (435 pp.). Madrid, España: Colegio de Caminos, Canales y Puertos.
- Maksimovic, C. (2001). *Urban drainage in specific climates*, Francia: UNESCO – Technical Documents in Hydrology, Vol. I, N°40, 277 pp.
- Mendez, G. J., Depettris, C. A., Orfeo, O., Ruberto, A. R., & Pilar, J. V. (2010). *Curva clave de sedimentos de una microcuenca en Resistencia, Chaco, Argentina*. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay.
- Mendez, G. J., Ruberto, A. R., & Pilar, J. V. (2009). *Regionalización de precipitaciones para las provincias de Chaco, Formosa y Santiago del Estero*. XXII Congreso Nacional del Agua, Argentina. Trelew (Chubut), Argentina.
- Mendez, G. J., Ruberto, A. R., Pilar, J. V., & Depettris, C. A. (mayo de 2011). *Regionalización de Precipitaciones Máximas Acumuladas de 7, 15 y 30 días para las Provincias de Chaco y Formosa*. *Revista ASAGAI*, (26), 71-78.
- Mendez, G. J. (2013). *Sedimentos en el drenaje urbano*. Tesis de Maestría en Ciencias la Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste. Resistencia (Chaco), Argentina.
- Niemczynowicz, J. (1996). *Challenges and Interactions in Water Future*. *Environmental Research Forum Transtec Publications*, 34, 1-10.
- Novotny, V. (1991). *Urban diffuse pollution: Sources and abatement*. *Water Environment & Technology*. 3 (12), 60-65.
- Orfeo, O. (1997). *Comparación sedimentológica y geomorfológica de los ríos Paraná y Paraguay en su área de confluencia*. Primer Congreso Latinoamericano de Sedimentología-VIII Congreso Geológico Venezolano, Sociedad Venezolana de Geólogos-International Association of Sedimentologists. Porlamar (Isla Margarita).
- Poleto, C. (2008). *Ambiente sedimentos*. Porto Alegre, Brasil: Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- Porto, M. F. A. (2001). *Urban Drainage in Specific Climates*. In *Technical Documents in Hydrology* (pp. 103-124). Vol. I, No. 40, Cap 4. Paris, Francia: UNESCO.
- Ramos, C. (1995). *Drenagem Urbana* (pp. 249-250). Cap. 6. Porto Alegre, Brasil: Editora de la UFRGS.

Segemar (1997). *Mapa geológico de la República Argentina*. Buenos Aires: Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino.

Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación Argentina (2009). *Criterios conceptuales propuestos para la integración, articulación y actualización tendientes al completamiento y desarrollo del Plan Director Básico de Drenaje Pluvial de La Cuenca del Río Matanza-Riachuelo* (78 pp.). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina: Ministerio De Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios de la Nación - Secretaría de Obras Públicas.

Vanoni, V. A. (1975). *Sedimentation Engineering* (418 pp.). New York, Estados Unidos: ASCE.

Dirección institucional de los autores

Mg. Ing. Guillermo José Mendez

Mg. Ing. Carlos Alberto Depettris

Dr. Jorge Víctor Pilar

Ing. Alejandro Ricardo Ruberto

Grupo de Investigación del Departamento de Hidráulica
Facultad de Ingeniería

Universidad Nacional del Nordeste

Av. Las Heras 727 (CPA H3500COI)

Resistencia, ARGENTINA

Teléfono +37 (22) 427 006, interno 142

guillermojosemendez@hotmail.com

cdepettris@ing.unne.edu.ar

aruberto@ing.unne.edu.ar

jpilar@ing.unne.edu.ar

Dr. Oscar Orfeo

Vicedirector

Centro de Ecología Aplicada del Litoral

Ruta Provincial núm. 5, km 2.5

3400, Corrientes, ARGENTINA

Teléfono: +54 (379) 4454 417

oscar_orfeo@hotmail.com



Haga clic aquí para escribir al autor



Remanente de la tormenta *Simón*, Bahía San Quintín, Baja California, México.

Foto proporcionada por Fabiola Arellano Lara.

Estimación del potencial de tormentas vía la combinación de imágenes satelitales e información meteorológica: caso de estudio al noroeste de México

• Fabiola Arellano-Lara* • Carlos Escalante-Sandoval •
Universidad Nacional Autónoma de México

*Autor de correspondencia

Resumen

Arellano-Lara, F., & Escalante-Sandoval, C. (septiembre-octubre, 2014). Estimación del potencial de tormentas vía la combinación de imágenes satelitales e información meteorológica: caso de estudio al noroeste de México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(5), 39-61.

México sufre frecuentes inundaciones provocadas por tormentas generadas por los sistemas convectivos de mesoescala, por lo que es importante realizar su caracterización, a fin de estimar con cierto tiempo de antelación la cantidad de lluvia que producirán. Este trabajo presenta una metodología para la estimación del potencial de tormentas basada en el empleo de patrones antecedentes de éstas, obtenidos al acoplar datos medidos en superficie e información interpretada de imágenes de satélite, la cual fue aplicada a una región del noroeste de México. Los resultados mostraron que la información meteorológica puede ser empleada de manera aislada y eficiente en la estimación del potencial de tormentas con una anticipación de 12 horas.

Palabras clave: tormentas convectivas, imágenes de satélite, estimación potencial de tormentas.

Abstract

Arellano-Lara, F., & Escalante-Sandoval, C. (September-October, 2014). Estimation of Storm Potential by Combining Satellite Images and Meteorological Data: A Case Study in Northwestern Mexico. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(5), 39-61.

Mexico frequently experiences floods due to storms generated by Mesoscale convective systems. It is therefore very important to determine their characteristics in order to estimate in advance the amount of rain they will produce. This work presents a methodology to estimate potential storms based on their previous patterns by combining measured surface data and information interpreted from satellite images. This study was conducted in a region in northwestern Mexico. The results showed that meteorological information can be effectively used in isolation to estimate potential storms 12 hours in advance.

Keywords: Convective storms, satellite images, estimate of storm potentiality.

Recibido: 19/10/12
Aprobado: 13/02/14

Introducción

En la república mexicana existe una gran variedad de climas y condiciones hidrometeorológicas que en muchas ocasiones dan lugar a la ocurrencia de tormentas extremas e inundaciones, con los consecuentes daños a la población. En general, las regiones costeras son las más afectadas por esta clase de fenómenos.

En México, gran parte de las tormentas de alta peligrosidad son originadas por los sistemas convectivos de mesoescala (SCM), definidos

como un tipo especial de estructura nubosa de gran cobertura espacial (extensión de 100 km o más en una sola dirección).

Con el objetivo de generar acciones preventivas y de mitigación contra los efectos de estas lluvias extremas, es necesario realizar una caracterización del fenómeno, que permita estimar con cierto tiempo de antelación la cantidad de lluvia que se pudiera generar.

Una estimación eficiente de la lluvia para el pronóstico de escurrimientos requiere de la correcta medición de la distribución espacial y

temporal de la lluvia. Se ha considerado que el empleo de datos de lluvia registrados sólo por redes pluviométricas o radares meteorológicos no tiene la capacidad de observar por completo la evolución y magnitud de las tormentas convectivas debido a la cobertura espacial del fenómeno. Las alternativas empleadas para salvar esta condición han sido basadas en el uso de imágenes de satélite o en la combinación con datos de radar, superficie y modelos atmosféricos (Moses & Barret, 1986; Clark & Morris, 1986; Creutin, Lacombe, & Obled, 1986; Milford, Dugdale, & McDougall, 1994; Carn, 1994; Hubert & Toma, 1994; Laurent, 1994; Touré & N'Diaye, 1994; Ravelo & Santa, 2000; Rojas & Eche, 2005; Feidas *et al.*, 2005; Feidas *et al.*, 2008; Sawunyama & Hughes, 2008).

En este trabajo se presenta una metodología para la estimación del potencial de tormentas basada en el empleo de patrones antecedentes

de éstas, obtenidos del acoplamiento de datos medidos en superficie e información interpretada de imágenes de satélite.

Zona de estudio

El análisis se realizó en la región noroeste de México, que abarca los estados de Chihuahua, Durango, Sonora y Sinaloa, la cual se caracteriza por su gran variabilidad hidrológica espacio-temporal (figura 1).

El estado de Chihuahua se localiza en la parte central del norte del país y abarca una superficie de 247 455 km², distribuida en 67 municipios, y con una población de 3 640 000 habitantes. El territorio de Chihuahua pertenece a dos grandes provincias fisiográficas que dividen al estado en dos mitades: la provincia de Cuencas y Sierras al este, y la Sierra Madre Occidental al oeste. Los recursos

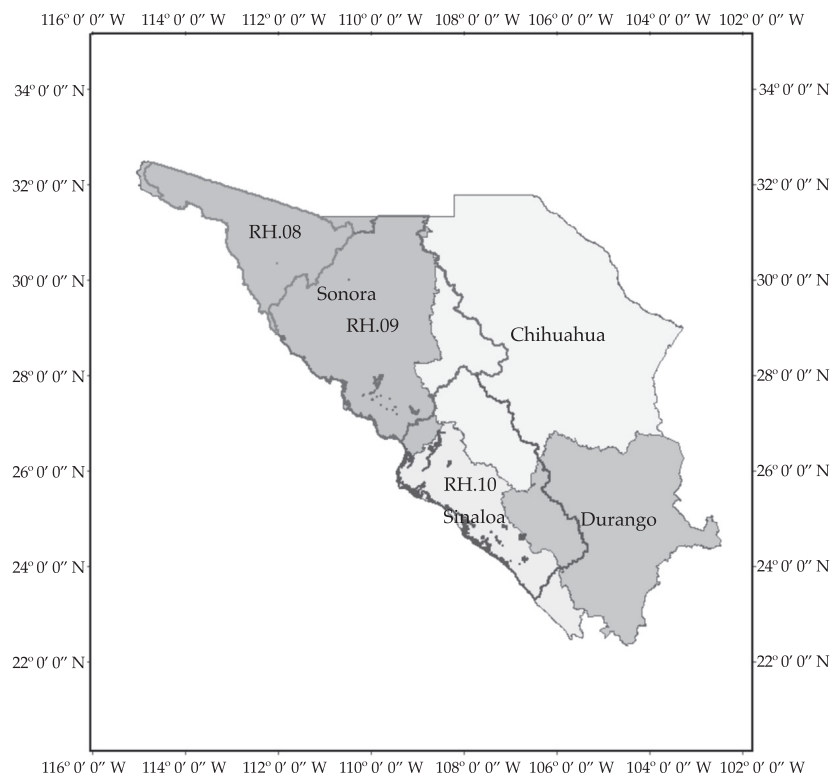


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

hidrológicos de Chihuahua se alimentan de una precipitación media anual de 470 mm. El potencial hidrológico del estado lo integran los tributarios de los ríos Yaqui, Mayo, Fuerte y Sinaloa, los cuales alimentan las cuencas que dan su riqueza agrícola a Sonora y Sinaloa; sin embargo, su velocidad y encajonamiento impiden el aprovechamiento local. También son aprovechables las aguas del río Conchos, que nace en las estribaciones de la Sierra Tarahumara y aquellos de la vertiente interna, como son el de Casas Grandes, Santa María y del Carmen, que desembocan en lagunas de escaso almacenamiento debido a las filtraciones y la rápida evaporación. Los climas predominantes en el estado son el muy seco templado (26%), semiseco templado (16%) y muy seco semicálido (15%). La presencia de los eventos hidrometeorológicos extremos, aun y cuando contribuye a incrementar el almacenamiento en presas y lagos, también puede causar daños a la población, infraestructura, servicios y sistemas productivos. Al respecto, las inundaciones de 1990 en la entidad provocaron la muerte de 200 personas y daños económicos de 2.5 millones de dólares. La presencia en 2001 del huracán *Iris* generó pérdidas valuadas en 14.9 millones de dólares, en tanto que para los eventos extremos del año 2006, las pérdidas sumaron 163.8 millones de dólares (Cenapred, 2013).

El estado de Durango colinda con dos de los estados de la región en estudio: Chihuahua y Sinaloa. La superficie es de 123 181 km², divididos en 39 municipios, en los cuales viven cerca de 1 730 000 habitantes. La altitud promedio es de 1 775 msnm y el aspecto físico de la superficie de la entidad está definido por cuatro provincias fisiográficas: Sierra Madre Occidental, sierras y llanuras del norte, Sierra Madre Oriental y mesa del centro. La hidrografía está representada por las corrientes principales de los ríos Nazas, Aguanaval, Baluarte, Mezquital, Acajoneta, Tepehuanes, Ojo Caliente y Tamazula, sobre los cuales se han ubicado las presas Francisco Zarco, Lázaro Cárdenas (El Palmito), Peña de Águila, San Bartoleo y la Guadalupe Victoria, todas

ellas para riego y uso piscícola. Los climas en Durango pueden variar del semitropical, con temperaturas generalmente altas, al francamente seco en la parte oriente del estado. La ocurrencia de lluvias torrenciales en el estado ha dejado a su paso la pérdida de vidas y daños económicos, que se han incrementado con el tiempo. El evento de septiembre del año 2000 generó pérdidas económicas de alrededor de 620 000 dólares; las de 2002 sumaron 800 000 dólares, con 20 000 personas afectadas y 4 000 viviendas dañadas. Aunque en el año 2006 las pérdidas fueron de sólo 8 000 dólares, se tuvo que lamentar la pérdida de 12 personas. Finalmente, en agosto del año 2008, las lluvias provocaron pérdidas por 32.1 millones de dólares (Cenapred, 2013).

El estado de Sinaloa se localiza al noroeste de la república mexicana, colindando al norte con los estados de Sonora y Chihuahua, al este con Durango, al sur con Nayarit, y al oeste con el océano Pacífico y Golfo de California. Tiene una extensión territorial de 58 092 km² y una población 2 950 000 habitantes asentados en sus 18 municipios. El sistema orográfico de Sinaloa consiste en un conjunto de unidades montañosas que se desprenden de la Sierra Madre Occidental, introduciéndose a la entidad por los municipios que colindan con los estados de Nayarit, Durango, Chihuahua y Sonora. La mayor parte del territorio sinaloense está constituido por terrenos planos, el resto lo forma una pequeña porción montañosa. Aproximadamente el 80% de los terrenos de la entidad se localiza por debajo de los 600 msnm y más de la mitad de la superficie del territorio se ubica por debajo de los 150 msnm, dando por resultado una elevación media de 344 msnm. En el estado, menos del 1% de la superficie sobrepasa los 1 820 metros de altitud. Posee 11 ríos que surten agua a sus presas, mismas que generan la energía eléctrica y conforman la infraestructura básica de riego, gracias a la cual se ha desarrollado la mejor agricultura tecnificada del país. Los climas predominantes en el estado son el cálido subhúmedo con lluvias en verano (36%), semiseco muy cálido (21%) y

el seco muy cálido (18%). En el estado se han presentado dos eventos hidrometeorológicos muy importantes: el primero ocurrió en el año 2002, cuando las inundaciones provocaron la pérdida de 20 000 ha de cultivos y cuyo monto ascendió a 5.5 millones de dólares; en el año 2006, las pérdidas económicas se estimaron en 163.8 millones de dólares y seis decesos (Cenapred, 2013).

El estado de Sonora se localiza en el extremo noroeste del país. Cuenta con una extensión territorial de 184 934 km² y una población al año 2013 de unos 2 850 000 habitantes. Está dividido políticamente en 72 municipios. La orografía se compone de montañas, lomeríos y zonas planas; estas dos últimas son las que dominan el estado. Los principales ríos con que cuenta el estado son los siguientes: Colorado, Concepción, San Ignacio, Sonora, Mátepe, Yaqui y el Mayo. Asimismo, cuenta con importantes presas, como Álvaro Obregón, Adolfo Ruiz Cortines, Plutarco Elías Calles, Abelardo Rodríguez y Lázaro Cárdenas. En 90% del estado su clima es seco y semiseco y, en general, predomina la poca disponibilidad del agua y la sobreexplotación de sus mantos acuíferos. De los cuatro estados involucrados en la zona de estudio, Sonora es el que más ha resentido los efectos adversos de los fenómenos hidrometeorológicos extremos. En octubre del año 2000, la presencia del huracán *Keith* afectó la quinta parte de la superficie estatal y generó daños por 5.2 millones de dólares. En el año 2001, el huracán *Juliette* provocó la muerte de siete personas, afectó a 16 365 habitantes y dañó 15 344 viviendas y 44 210 km de caminos, con un monto de pérdidas de 72.4 millones de dólares. En el año 2006 hubo 14 personas muertas y cerca de 72 000 dólares en daños. En 2008, las tormentas tropicales de septiembre y octubre impactaron económicamente por un monto de 33.5 millones de dólares. Por último, en el año 2009, la ocurrencia del huracán *Jimena* generó pérdidas por 78.8 millones de dólares (Cenapred, 2013).

A los efectos sociales y económicos que se han generado en los últimos diez años habrá

que sumarle los provocados en el mes de septiembre de 2013 por la presencia simultánea del huracán *Ingrid* y la tormenta tropical *Manuel*.

Los daños asociados con la ocurrencia de inundaciones se han incrementado de manera importante debido a los asentamientos humanos ubicados de forma irregular en áreas próximas a los ríos, al no respeto al ordenamiento territorial y, principalmente, al proceso acelerado de deforestación de la parte alta de las cuencas, cuyo efecto se refleja en un incremento en el escurrimiento superficial, y el transporte de suelos y sedimentos hacia las planicies.

La reducción de daños por efecto de las inundaciones consiste en adoptar medidas estructurales y no estructurales. Este trabajo se inserta en esta última, ya que pretende contar con una herramienta que pueda establecer la magnitud de la lluvia que es susceptible de precipitarse en cierto sitio con un periodo de antelación de 12 horas, de tal forma que permita generar mecanismos de respuesta por parte de las autoridades de protección civil para salvaguardar la vida de los habitantes y de sus bienes.

Materiales y métodos

En la región en estudio, la temporada del monzón está directamente asociada con la ocurrencia de tormentas severas producidas por la combinación de diversos factores, como condiciones de inestabilidad atmosférica, características del relieve debidas a la barrera orográfica creada por Sierra Madre Occidental y distintos tipos de climas inmersos en la zona.

El periodo de tiempo de información disponible de imágenes de satélite para el estudio fue del año 2004 al 2006; por lo tanto, en este lapso fue realizado el acoplamiento de ambos tipos de datos. A continuación se describen los dos diferentes análisis mencionados, además del estudio de acoplamiento de datos de tormentas entre éstos.

Se crearon bases de datos a partir de los registros de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA), con la finalidad de obtener las condiciones meteorológicas antecedentes a la ocurrencia de tormentas moderadas ($10 < H_p$ (mm) < 20) y fuertes ($20 < H_p$ (mm) < 50). Dado que en julio se presenta la mayor acumulación de la precipitación en la región (figura 2), se decidió considerar sólo las lluvias disponibles de este mes en el periodo 1999-2006.

En particular, las estaciones de medición empleadas en la zona montañosa del estado de Chihuahua se listan en el cuadro 1 (figura 3).

La información recolectada de cada tormenta corresponde a las condiciones climáticas prevalecientes 12 horas antes de la ocurrencia de la tormenta y cuatro horas posteriores a ésta. Las variables consideradas son: dirección del viento (Dir), dirección de la ráfaga de viento (WSMDir), velocidad del viento (WSK),

velocidad de la ráfaga de viento (WSMK), temperatura (Temp), humedad relativa (HR), precipitación, presión barométrica (BP) y radiación solar (RS).

La información fue procesada en promedios horarios sobre las variables registradas, excepto para la precipitación, donde los registros fueron acumulados. Con la información así preparada se obtuvieron las curvas del comportamiento en el tiempo para cada variable asociada con los rangos de tormentas en cuestión, meses y sitio de estudio. A su vez, estas curvas de evolución permitieron la identificación de aquellas variables cuyos patrones son más significativos para el acoplamiento con la información de imágenes de satélite. Se emplearon 105 tormentas moderadas y 44 tormentas fuertes distribuidas de acuerdo con el cuadro 2.

A partir de la información recolectada y procesada, se seleccionaron aquellas variables

Lluvia medio mensual región NW de México

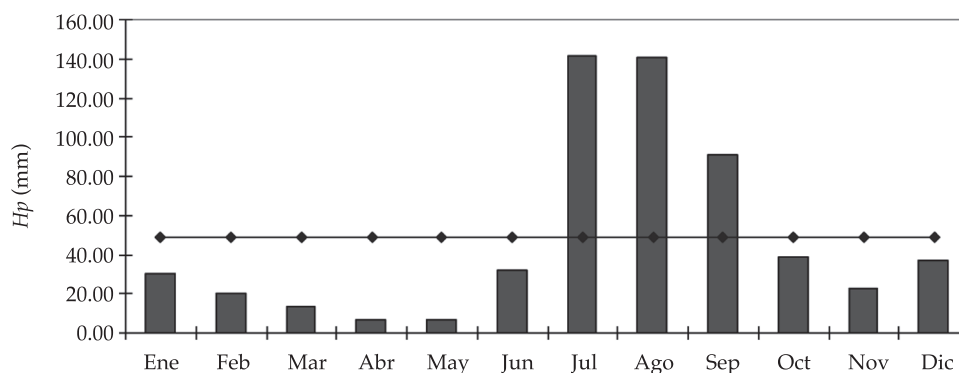


Figura 2. Distribución de la lluvia mensual en la zona de estudio.

Cuadro 1. Características generales de las EMA dentro de la zona de estudio.

Estado	Nombre	Fecha-inicio	Latitud	Longitud	Altitud (m)
Chihuahua	Basesachi	07-may-99	28° 11' 57"	108° 12' 32"	1 973
	Chinatú	04-jun-99	26° 13' 46"	106° 46' 14"	1 982
	Chinipas	24-may-99	27° 23' 34"	108° 32' 11"	431
	Guachochi	31-may-99	26° 48' 49"	107° 04' 23"	2 390
	Maguarichi	10-jun-99	27° 51' 30"	107° 59' 40"	1 663
	Urique	15-abr-99	27° 12' 56"	107° 55' 1"	577

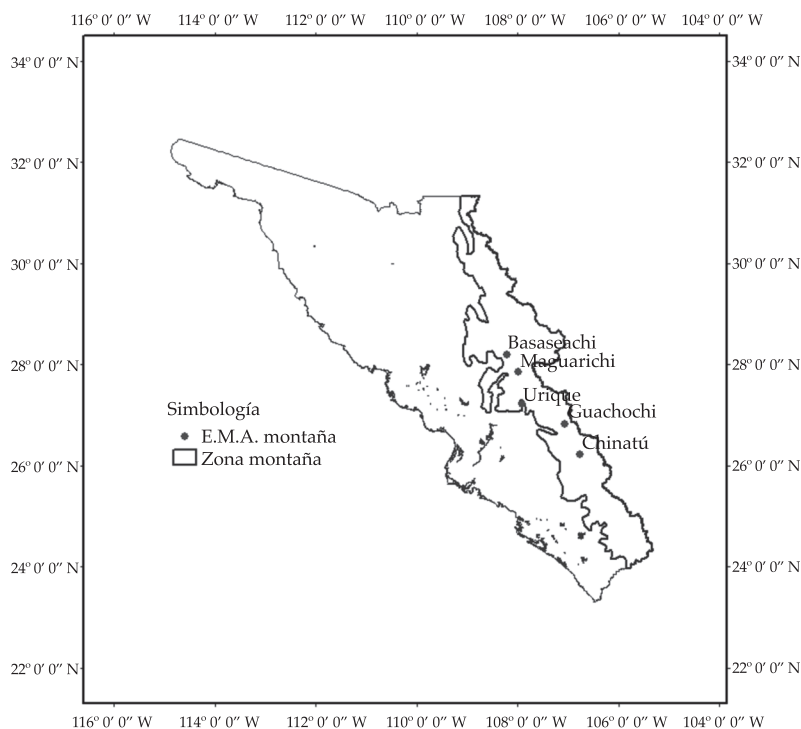


Figura 3. Ubicación de las EMA dentro de la zona montañosa analizada.

que presentaron los comportamientos promedios (zona de montaña) en el tiempo más perceptibles en 12 horas previas a la ocurrencia de la lluvia. Tales variables son la temperatura y la humedad relativa. Se evaluaron los coeficientes de correlación entre todas las variables mencionadas por rango de tormenta y los valores más altos concordaron con la correlación entre temperatura y humedad relativa de -0.996 y -0.988 para tormentas moderadas y fuertes, lo cual se

puede observar en los cuadros 3 y 4. Así, fue seleccionada la variable de temperatura promedio en superficie para efectuar el análisis de acoplamiento con las temperaturas interpretadas de imágenes de satélite por tratarse del mismo tipo de variable, asegurando así mayor certeza.

Se observó además que la mayoría de las variables presentó diferencias sensibles entre los dos rangos de tormentas del estudio (moderadas y fuertes), excepto por la presión barométrica, que no mostró variaciones. La dirección del viento (Dir) no exhibió un patrón evidente antecedente a la ocurrencia de la lluvia en los casos mencionados, por lo contrario del resto de las variables.

Con base en los resultados comentados, se continuó con el análisis de acoplamiento entre las temperaturas promedio en superficie y las temperaturas obtenidas de imágenes de satélite entre los casos de estudio identificados previamente con este propósito.

Cuadro 2. Tormentas de montaña empleadas para el análisis climático antecedente en superficie.

EMA	Tormentas moderadas	Tormentas fuertes
Basesachi	19	10
Chinatú	21	9
Guachochi	23	10
Maguarichi	22	6
Urique	20	9
Total	105	44

Cuadro 3. Coeficientes de correlación entre las variables meteorológicas medidas en superficie para tormentas moderadas.

	Dir_10	WSK_10	Tmont_10	HR_10	BP_10	SR_10
Dir_10	1	0.156	-0.158	0.214	-0.081	-0.409
WSK_10		1	0.758	-0.729	-0.854	0.517
Tmont_10			1	-0.996	-0.82	0.929
RH_10				1	0.82	-0.941
BP_10					1	-0.6
SR_10						1

Cuadro 4. Coeficientes de correlación entre las variables meteorológicas medidas en superficie para tormentas fuertes.

	Dir_20	WSK_20	Tmont_20	RH_20	BP_20	SR_20
Dir_20	1	0.026	-0.143	0.192	-0.244	-0.454
WSK_20		1	0.7	-0.679	-0.836	0.493
Tmont_20			1	-0.988	-0.857	0.896
RH_20				1	0.839	-0.925
BP_20					1	-0.599
SR_20						1

Para el estudio de las tormentas a través de las temperaturas de brillo obtenidas de las imágenes de satélite, se identificaron aquellas tormentas registradas en superficie comprendidas dentro del periodo 2004-2006, lapso con imágenes satelitales disponibles.

Las imágenes de satélite fueron proporcionadas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de México. Se utilizaron las imágenes correspondientes al espectro infrarrojo (IR) en la banda 10.7 μm (canal 4), provenientes de los satélites GOES-11 y GOES-12, los cuales observan al territorio mexicano.

En general, el procesamiento de las imágenes IR consistió en la transformación de los valores de píxeles de las imágenes (0 a 255) a temperaturas de brillo en $^{\circ}\text{C}$. La formulación utilizada para la estimación de las temperaturas de nubes frías en esta investigación fue la correspondiente a la Curva Estándar de la NOAA (NOAA, 1975; Weinreb *et al.*, 1997), desarrollada propiamente para imágenes IR en formato de 8 bits provenientes de los satélites GOES (NASA, 2005).

Las temperaturas de brillo obtenidas bajo éste u otros procedimientos son empleadas

en la inferencia de precipitación a través de diversas técnicas indirectas relacionadas con datos infrarrojos. De acuerdo con Barret y Martin (1981), las técnicas de estimación de lluvia basadas en datos infrarrojos y visibles se dividen en: índice de nube, historia de vida, métodos bi-espectrales, y en técnicas de modelos de nubes. Asimismo, métodos que emplean datos infrarrojos y la combinación de visibles e infrarrojos son Barret (1970); Arkin (1979); Dittberner y Vonder Haar (1973); Lovejoy y Austin (1979); Tsonis e Isaac (1985), Stout, Martin y Sikdar (1979); Griffith-Woodley Technique (Griffith *et al.*, 1976); Gruber (1973); Wylie (1979); Técnica Convectiva-Estratiforme de Adler y Negri (1988), y el esquema de Scofield y Oliver (1977).

Las ecuaciones de conversión de temperaturas de brillo de la NOAA consideran como umbral inicial de temperatura para nubes frías los -32°C . Estas conversiones hacen que las nubes y otros cuerpos fríos aparezcan en tonos blancos en una imagen, por el contrario de los cuerpos cálidos, como el terreno, que se muestran en tonos oscuros. De esta manera, las imágenes en canales IR son transformadas a

imágenes en canales visibles. Las expresiones para la transformación de valor de píxel a temperatura de brillo son las siguientes:

Nubes frías: si $B > 176$, entonces $T = 418 - B$

Nubes tibias: si $B \leq 176$, entonces $T = 330 - (B/2)$

Donde B es el valor de píxel.

De acuerdo con la literatura, han sido establecidos diferentes umbrales para las temperaturas de nubes frías relacionados con diferentes latitudes y tipos de satélites; por lo tanto, las ecuaciones de transformación a temperaturas de brillo presentan variaciones. La zona de estudio está localizada dentro de la región de América del Norte, hecho que permitió la aplicación de las formulaciones mencionadas sin modificaciones. En este contexto se utilizaron los conjuntos de imágenes cada 15 minutos, conformados por 12 horas previas y 4 horas posteriores a la ocurrencia de la lluvia para el rango de tormentas moderadas y fuertes. En los cuadros 5 y 6 se listan las tormentas moderadas y fuertes nombradas por una clave compuesta por la fecha, hora de inicio y hora de término de la lluvia.

La extensión superficial de todas las imágenes IR analizadas corresponde exactamente con la zona montañosa en superficie. Con este propósito se extrajeron de cada una de las imágenes IR los datos pertenecientes al área de estudio mencionada. Se procesaron las imágenes IR satelitales desde su formato nativo comprimido (valores de brillantez por píxeles en formato .PCX) hasta la transformación en formato espacial raster (mapas térmicos) con valores de temperaturas en °C. Para facilitar el manejo de las imágenes, a cada una le fue asignado el sistema de coordenadas NAD 27. Posteriormente, los mapas térmicos que de manera original se tenían en intervalos de 15 minutos fueron condensados a intervalos horarios que permitieran el acoplamiento con la información en superficie analizada por horas.

Cuadro 5. Lista de tormentas moderadas empleadas en el análisis.

Número	Fecha y hora de la tormenta	Lluvia (mm)
1	01/07/2004 23:10 - 23:50	10.66
2	07/07/2004 21:00 - 21:30	11.42
3	08/07/2005 21:30 - 22:00	18.04
4	08/07/2006 00:00 - 00:30	14.48
5	08/07/2006 20:50 - 21:20	12.2
6	14/07/2006 00:00 - 00:40	19.55
7	22/07/2005 17:50 - 18:30	15.49
8	24/07/2004 00:10 - 01:00	11.68
9	24/07/2005 01:20 - 02:10	19.3
10	28/07/2004 23:10 - 23:50	11.94

Cuadro 6. Lista de tormentas fuertes empleadas en el análisis.

Número	Fecha y hora de la tormenta	Lluvia (mm)
1	02/07/2004 22:00 - 22:50	32.76
2	03/07/2005 21:00 - 21:40	20.07
3	04/07/2004 20:10 - 21:30	20.05
4	04/07/2006 22:20 - 23:20	23.11
5	05/07/2006 02:20 - 03:00	22.86
6	09/07/2006 01:20 - 02:00	26.66
7	20/07/2004 20:20 - 20:50	21.33
8	22/07/2004 04:00 - 04:40	20.58
9	22/07/2004 21:40 - 22:10	21.33
10	27/07/2005 22:10 - 22:50	22.11

La naturaleza de los datos en superficie, es decir, las series horarias de temperaturas, determinaron la discretización de los mapas térmicos en datos concretos estadísticos, esto es, series de valores promedios, máximos y mínimos de temperaturas horarias sobre la zona de estudio, las cuales son denominadas series de satélite. Una vez unificadas las series de tiempo de temperaturas en superficie y satelitales fue realizada la comparación entre ambos datos con base en la evolución temporal de los patrones promedios y la correlación entre ambas variables tanto para el rango de tormentas mo-

deradas como fuertes. Así fueron obtenidos los coeficientes de correlación entre los datos en superficie y las series paramétricas de satélite sobre ambos rangos de tormentas. La evolución temporal de las series paramétricas satelitales, al igual que la serie de temperaturas en superficie para cada rango de tormentas analizadas se muestran en las figuras 4 y 5, donde PromT_Mont_10, 20 = temperatura promedio en superficie, tormentas moderadas/fuertes Med_min/max/med = temperaturas promedio de brillo mínimas, máximas y promedios asociadas con tormentas moderadas/fuertes.

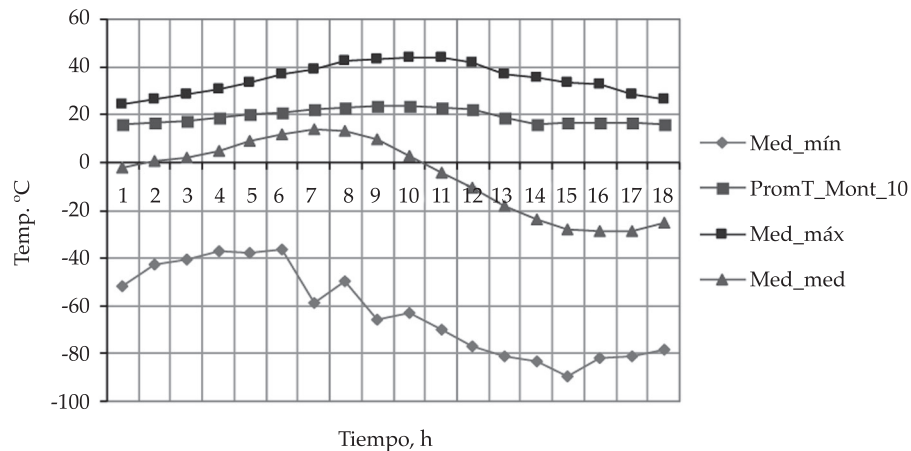


Figura 4. Curvas de temperaturas promedio, tormentas moderadas.

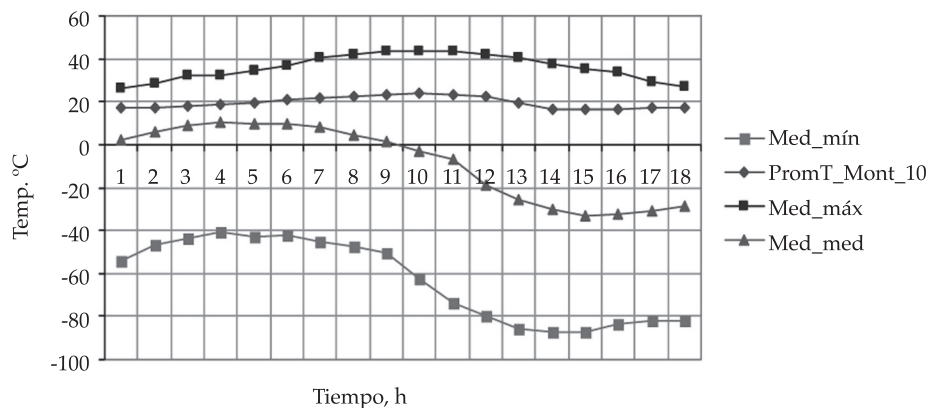


Figura 5. Curvas de temperaturas promedio, tormentas fuertes

En ambos tipos de tormentas, los coeficientes de correlación más altos correspondieron a las temperaturas de satélite máximas obtenidas a partir de los mapas térmicos. Este hecho es evidente en las curvas respectivas mostradas en las figuras 4 y 5, por rango de tormentas. Los resultados de los coeficientes de correlación se presentan en el cuadro 7.

La diferencia entre los patrones de las clases de temperaturas por tipo de tormentas es apenas perceptible debido a la extensa cobertura espacial del análisis correspondiente a la zona montañosa completa. Sin embargo, la gran correlación identificada entre los valores de temperaturas en superficie y de satélite en las 12 horas previas a la ocurrencia de lluvia sustentó la realización posterior de este mismo análisis de acoplamiento de temperaturas en las regiones circundantes de influencia a las estaciones meteorológicas automáticas localizadas en la zona de montaña, como son Basesachi, Chinatú, Guachochi, Maguarichi e Urique.

Con base en los resultados anteriores se realizó la extracción de información sobre imágenes IR para los mismos grupos de tormentas en estudio (moderadas y fuertes), esto de acuerdo con cada una de las regiones influenciadas por las EMA localizadas en la zona montañosa. La delimitación de estas regiones parciales se llevó a cabo según los siguientes criterios: las fronteras oriente y poniente de cada una de las regiones parciales corresponden a los bordes oriente y poniente de la zona montañosa; las divisiones transversales entre cada EMA son líneas aproximadamente perpendiculares al litoral, trazadas a las distancias centrales entre EMA. En los casos

de las estaciones en los extremos (Basesachi y Chinatú), los límites externos regionales y transversales a la zona montañosa se encuentran en sus respectivas distancias medias interiores. Estas condiciones son indiscriminadas, ya que la finalidad de este segundo ensayo fue obtener resultados con menor dispersión entre clases de temperaturas, sujetos a áreas de influencia asociadas con las estaciones en superficie. La distribución de las regiones de muestra en la figura 6.

Tormentas fuertes (rango 20-50), zona montañosa

Se realizó el procedimiento descrito del análisis en la zona de montaña para la obtención de los conjuntos de mapas térmicos parciales asociados con los casos de estudio de tormentas medidas en superficie. También se determinaron las condiciones en superficie. Del análisis de los coeficientes de correlación sobre las series de temperaturas en superficie y las series de temperaturas de brillo (máximas, mínimas y promedio) de las respectivas imágenes infrarrojas, ambas asociadas con la muestra de tormentas fuertes obtenidas 12 horas previas a la ocurrencia de lluvia en la zona de montaña, se encontró lo siguiente:

1. De acuerdo con los coeficientes de correlación correspondientes a temperaturas de brillo mínimas (más frías) y temperaturas promedio en superficie, sólo cuatro de las tormentas presentaron valores entre ± 0.6 y 1.0 , es decir que solamente el 40% de la muestra guarda estrecha relación entre estas temperaturas, pero no es significativa para el análisis, como se observa en la figura 7a. El valor promedio de correlación para las cuatro tormentas es de -0.821 .
2. En cuanto a los coeficientes r entre temperaturas de brillo máximas (más cálidas) y temperaturas promedio en superficie, se observó que el 80% de tormentas de la muestra tuvo valores entre ± 0.6 y 1 . Este comportamiento resulta muy

Cuadro 7 Coeficientes de correlación entre superficie y satélite, 12 h previas a la precipitación.

Temperatura	Tormentas moderadas	Tormentas fuertes
Mínima	-0.652	-0.53
Media	0.178	-0.542
Máxima	0.984	0.989

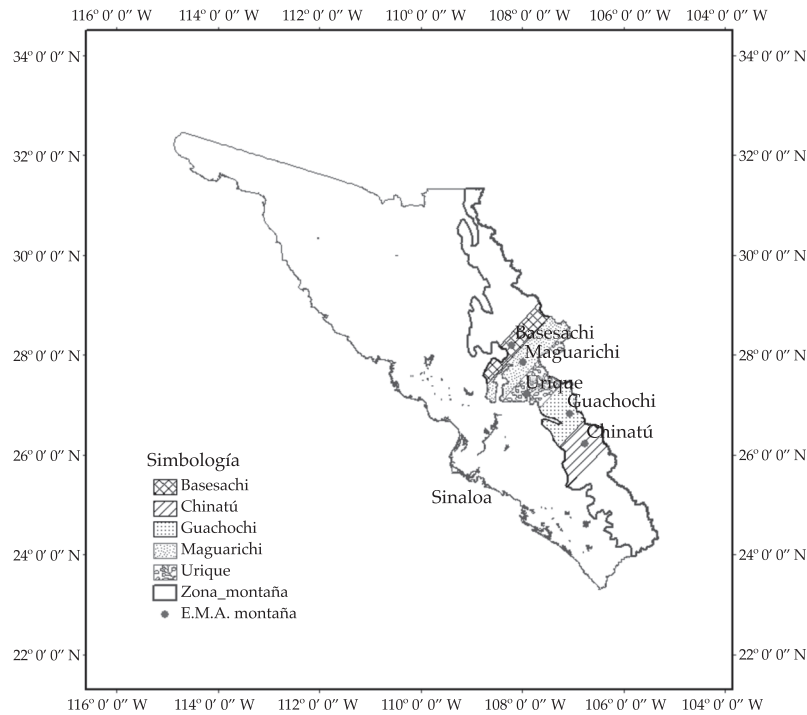


Figura 6. Cobertura de las regiones parciales dentro de la zona de montaña.

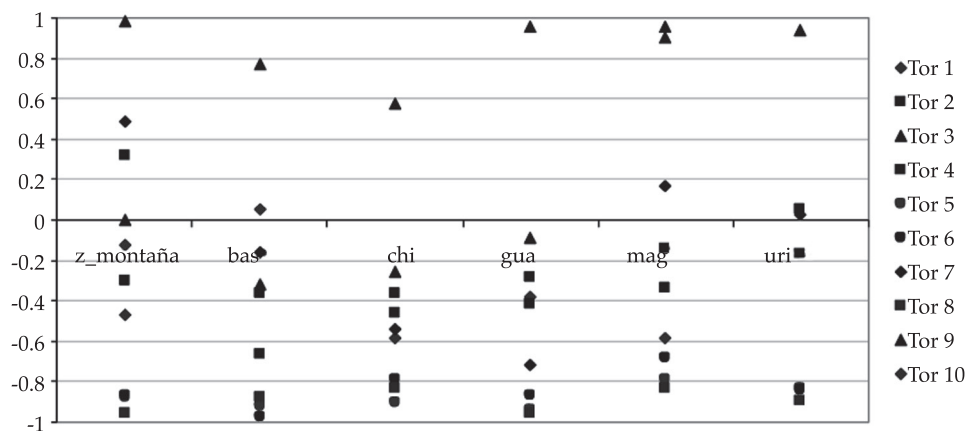
importante e implica una fuerte relación entre tales valores, como se observa en la figura 7b. El valor promedio de correlación para las ocho tormentas es de 0.835.

3. El 40% de las tormentas de la muestra presentó valores entre temperaturas de brillo medias y temperaturas promedio en superficie, oscilando en el rango ± 0.6 y 1, lo cual significa que no hay buena relación entre tales variables, como se observa en la figura 7c. El valor promedio de correlación para las cuatro tormentas es de -0.772.

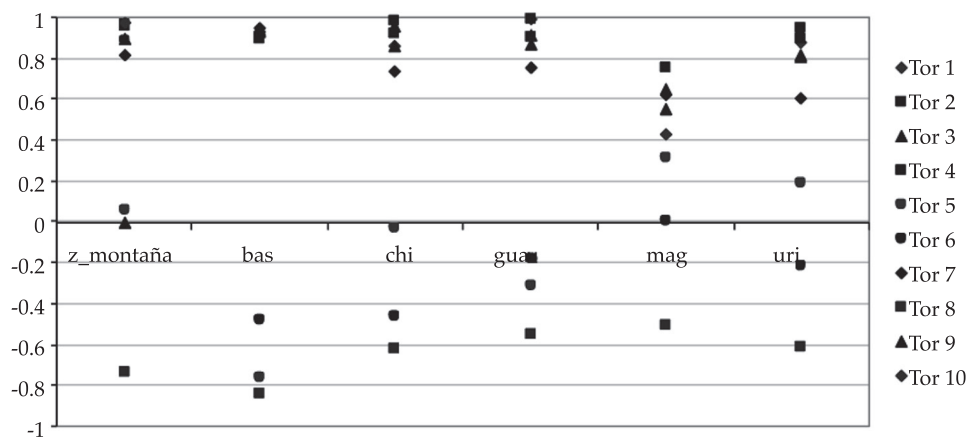
De estas observaciones, la relación más representativa para las tormentas de la muestra se obtuvo entre las temperaturas promedio en superficie y las temperaturas de brillo máximas correspondientes. Sin embargo, no se obtuvo una marcada diferencia entre los coeficientes de correlación obtenidos en la zona de montaña extensa y aquellos para las regiones parciales relativas a las EMA.

Con el objetivo de evaluar en mayor detalle la relación encontrada entre temperaturas de superficie y temperaturas de brillo máximas se determinaron los siguientes parámetros: diferencias entre temperaturas de superficie y satélite Δssi , gradientes de evolución entre estas diferencias δssi , gradiente interno de evolución entre las temperaturas de satélite δsat_i y gradiente interno de evolución entre las temperaturas de superficie δsup_i . Estos parámetros se obtuvieron a partir de las respectivas series horarias tanto para la zona de montaña como para las zonas de influencia de las estaciones automáticas comprendidas dentro de ella y utilizando las series de temperaturas de brillo máximas correspondientes.

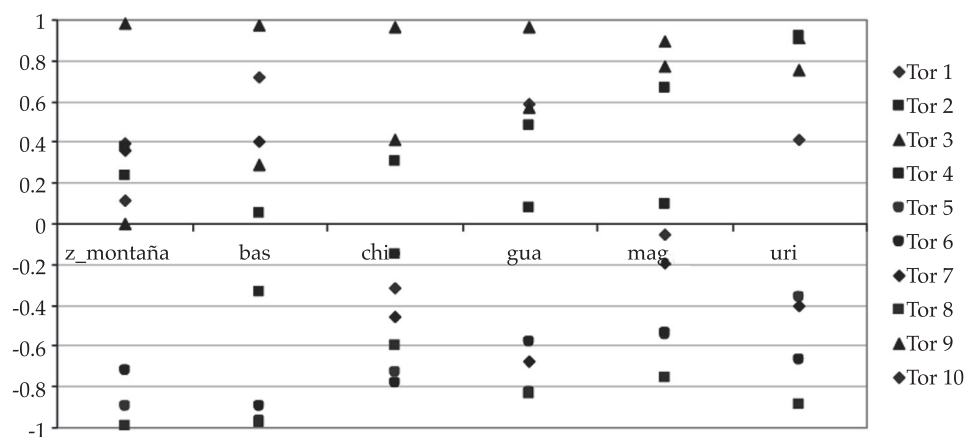
Las curvas de δssi para cada región parcial del estudio mostraron menores ordenadas que aquellas correspondientes a la curva de Δssi (figura 8), es decir que la disminución de áreas de influencia interviene claramente en



a) T. Superficie/T. de brillo mínimas



b) T. Superficie/T. de brillo máximas



c) T. Superficie/T. de brillo medias

Figura 7. Coeficientes de correlación temperaturas sup-satélite en zona montaña y zonas parciales, tormentas fuertes.

la reducción de las diferencias de ambos tipos de temperaturas. Esto se evidenció al obtener una baja desde los -15.14°C promedio en la zona de montaña hasta -6.92°C promedio en las zonas parciales de montaña. Además, las curvas δ_{ssi} mostraron que en las tres horas previas a la ocurrencia de la lluvia, los valores Δ_{ssi} (diferencias entre las temperaturas de sat y sup) son insignificantes. Es decir, que los resultados entre las curvas Δ_{ssi} y las series de δ_{ssi} fueron consistentes. En conjunto, estos parámetros evaluados demostraron la mejoría en las dispersiones entre ambas mediciones de temperaturas, al considerar las áreas parciales para cada una de las estaciones, en lugar de la zona extensa de montaña.

Con base en los valores Δ_{ssi} (diferencias de temperaturas de brillo máximas y temperaturas medias en superficie), medidos por cada una de las áreas parciales inscritas en la zona de montaña en un periodo de 12 horas previas a la ocurrencia de la lluvia, fueron determinadas las dispersiones con respecto a las mediciones obtenidas sobre la zona de montaña completa. Se encontró que, en efecto, al reducir espacialmente las áreas de estudio, se obtienen importantes disminuciones entre ambos tipos de temperaturas; sin embargo, aunque las reducciones no son constantes a lo largo del tiempo, éstas comienzan en 20% aproximadamente y a partir del instante 10, en todos los casos de regiones parciales, las diferencias en la aproximación a la hora de lluvia disminuyen en promedio un 80%. Esto es, que las temperaturas son idénticas en alto grado durante este lapso. Se concluye, por lo tanto, que relacionando el área de influencia a la estación de medición se obtiene gran disminución sobre las dispersiones entre clases de temperaturas y, por ende, el empleo de las mediciones meteorológicas en superficie es significativamente más confiable.

Tormentas moderadas (rango 10-20), zona montañosa

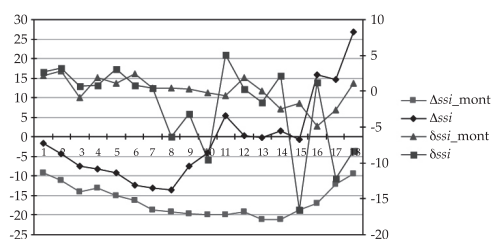
Se llevaron a cabo los análisis entre los mismos pares de temperaturas registradas en superficie y por satélite, tal como en el caso anterior, pero

en esta ocasión sobre las tormentas moderadas. A continuación se presentan los hallazgos:

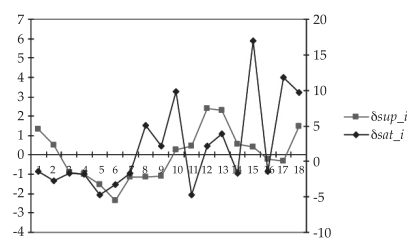
1. De acuerdo con los coeficientes de correlación correspondientes a temperaturas de brillo mínimas (más frías) y temperaturas promedio en superficie, sólo cuatro de las tormentas presentaron valores entre ± 0.6 y 1.0 , es decir que solamente el 40% de la muestra guarda estrecha relación entre estas temperaturas, pero no es significativa para el análisis, lo cual se muestra en la figura 9a. El valor promedio de correlación para las cuatro tormentas es de -0.722 .
2. En cuanto a los coeficientes r entre temperaturas de brillo máximas (más cálidas) y temperaturas promedio en superficie, se observó que el 80% de tormentas de la muestra tuvo valores entre ± 0.6 y 1 . Este comportamiento resulta muy importante e implica una fuerte relación entre los valores, lo cual se muestra en la figura 9b. El valor promedio de correlación para las ocho tormentas es de -0.812 .
3. El 40% de las tormentas de la muestra presentó valores de correlación, oscilando en el rango ± 0.6 y 1 entre temperaturas de brillo medias y temperaturas promedio en superficie, lo cual significa que no hay buena relación entre tales variables (figura 9c). El valor promedio de correlación para las cuatro tormentas es de 0.724 .

Se observó que los mejores coeficientes de correlación entre los grupos de variables descritas nuevamente correspondieron a la relación entre temperaturas promedio en superficie y temperaturas de brillo máximas, hecho consistente con el caso de estudio anterior para tormentas fuertes. Por lo tanto, se procedió con el análisis específico de los parámetros internos del grupo de series en cuestión, al igual que se hizo para las tormentas fuertes.

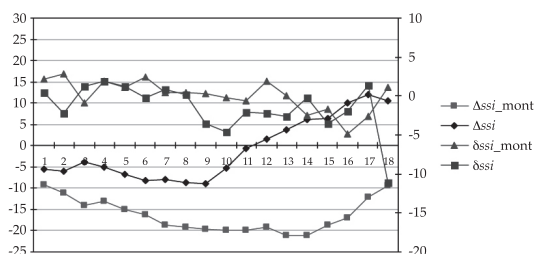
A partir de los parámetros obtenidos se observa que se cumple la mejoría de aproximación entre los dos tipos de temperaturas, al



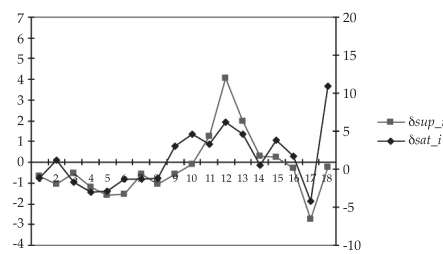
Basesachi Δssi y δssi



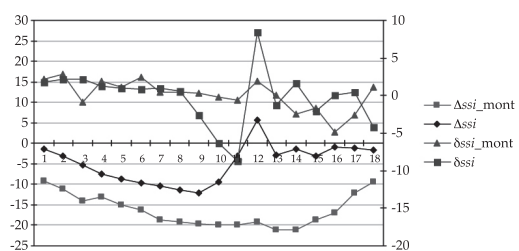
Basesachi δsup_i y δsat_i



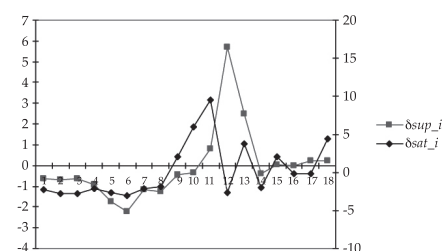
Chinatú Δssi y δssi



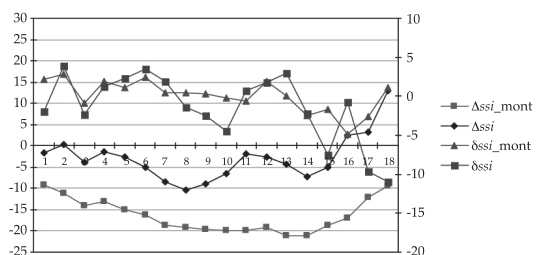
Chinatú δsup_i y δsat_i



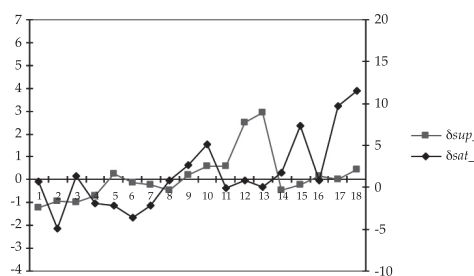
Guachochi Δssi y δssi



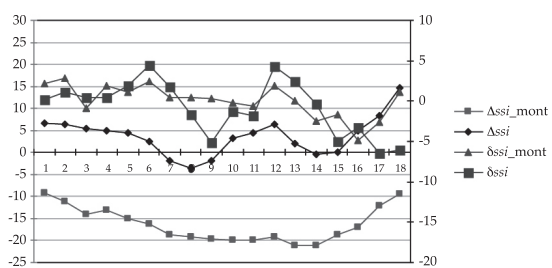
Guachochi δsup_i y δsat_i



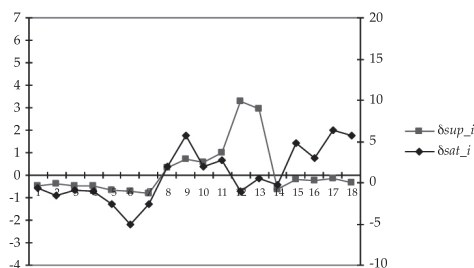
Maguarichi Δssi y δssi



Maguarichi δsup_i y δsat_{ii}

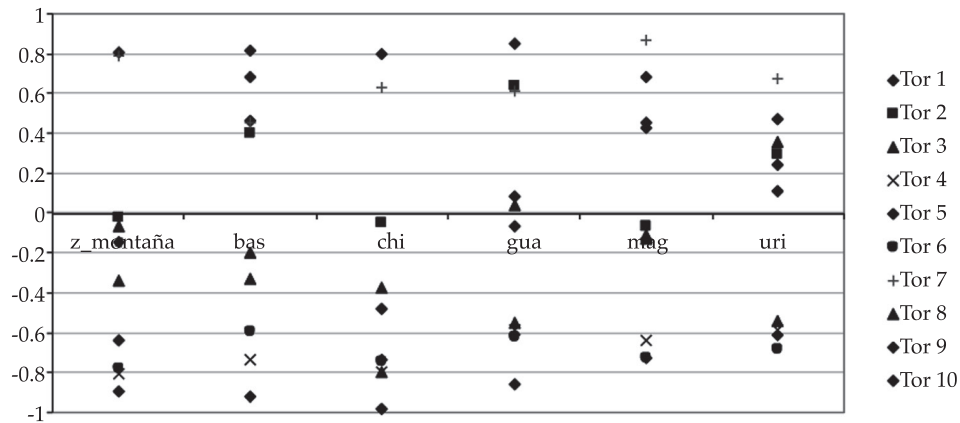


Urique Δssi y δssi

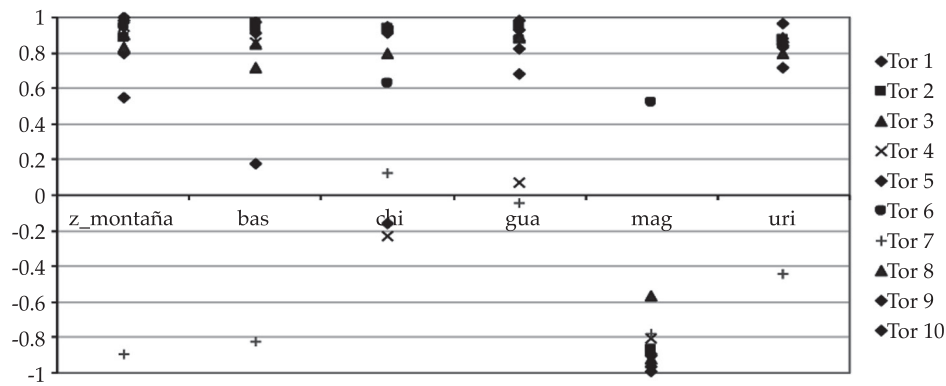


Urique δsup_i y δsat_i

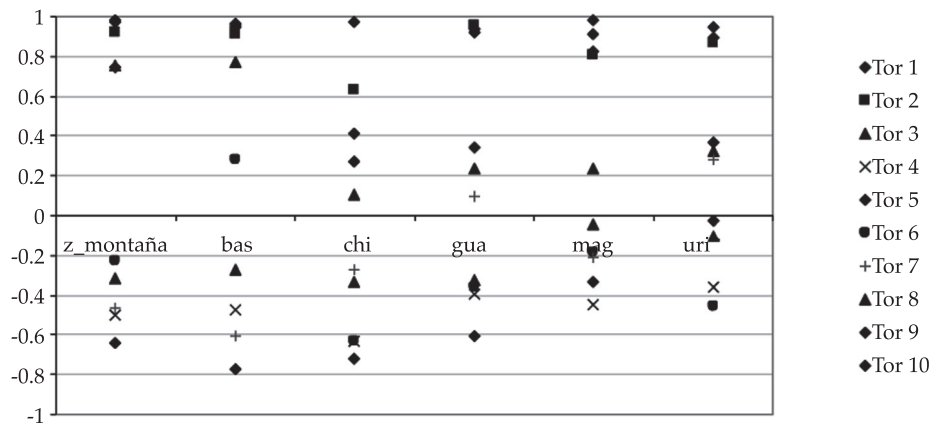
Figura 8. Curvas Δssi (diferencias de temp entre sup y sat) y curvas δssi (cambios propios de las diferencias en el tiempo), tormentas fuertes. Curvas δsat_i (evolución de los cambios de temperaturas en sat) y curvas δsup_i (evolución de los cambios de temperaturas en sup), zona montaña y zonas parciales, tormentas fuertes.



a) T. Superficie/T. de brillo mínimas



b) T. Superficie/T. de brillo máximas



c) T. Superficie/T. de brillo medias

Figura 9. Coeficientes de correlación temperaturas sup-satélite en zona montaña y zonas parciales, tormentas moderadas.

reducir la zona de estudio en zonas de influencia parciales para cada estación meteorológica

automática, ya que se obtuvo una disminución desde -14.05 °C promedio en la zona de monta-

ña, a $-5.82\text{ }^{\circ}\text{C}$ promedio en las zonas parciales de montaña. Sin embargo, a diferencia del caso de tormentas fuertes, las tormentas moderadas presentan durante las primeras tres horas previas a la lluvia diferencias entre las temperaturas en superficie y las de satélite de alrededor de cinco grados de temperatura, donde para los instantes similares en tormentas fuertes, las diferencias fueron casi insignificantes. Por otro lado, en relación con los valores de las curvas Δssi (series de diferencias entre temperaturas sup y sat) para la zona de montaña (figura 10), se encontró que, en promedio, los valores correspondientes a las zonas parciales alcanzaron una mejoría del 70%; la mayor similitud se presentó en las primeras 10 horas. Se debe precisar que las disminuciones instantaneas presentan variaciones a lo largo de las 12 horas de estudio. Este comportamiento también muestra que las condiciones atmosféricas previas a la lluvia, correspondiente a las tormentas fuertes, presentan ligeramente mejores patrones entre ambas mediciones (superficie y satélite); la mejoría promedio encontrada es del 10% aproximadamente.

También se hicieron análisis sobre las tendencias δsup_i (cambios en el tiempo de las series de datos en superficie), así como δsat_i (cambios en el tiempo de las series de datos obtenidas de satélite, temperaturas de brillo máximas). Con respecto a las tormentas fuertes, las curvas δsup_i y δsat_i para cada una de las zonas parciales y la zona de montaña mostraron alineamientos muy similares, en especial para las primeras nueve horas de las series.

En el caso de tormentas moderadas, la gran concordancia se presentó en las primeras 10 horas de las series. En este contexto, los Cv calculados sobre las series de temperaturas en superficie y satélite en tormentas fuertes obtenidas en las zonas parciales guardan una diferencia de -0.066 unidades en promedio, una desviación de 0.042 y con un factor de proporción entre Cv de aproximadamente 2 para ambas mediciones.

En relación con las tormentas moderadas, estos Cv calculados mostraron una diferencia promedio de -0.078 unidades, 0.064 de desviación estándar y un factor de proporción entre Cv de aproximadamente 1.76, valores calculados para las zonas parciales.

Las variaciones en el tiempo de δsup_i y δsat_i poseen tendencias con gran similitud para los dos tipos de tormentas analizadas, y Cv con alta aproximación entre las series, como se demostró. No obstante, las curvas δsup_i y δsat_i para las tormentas moderadas se aproximan mejor entre ellas, debido a que la inestabilidad en las condiciones atmosféricas es menor que el estado de la dinámica atmosférica relacionado con tormentas fuertes. En ambos casos, alrededor de la hora número 10, los valores de las curvas δsup_i y δsat_i son drásticos, a diferencia del comportamiento gradual en las horas anteriores, lo cual se debe a la cercana ocurrencia de la precipitación.

Los altos coeficientes de correlación encontrados entre las series de temperaturas medidas en superficie y las series de temperaturas máximas de brillo tanto para los rangos de tormentas fuertes y moderadas focalizadas sobre las áreas parciales de montaña, las diferencias entre los cambios internos en las series (δsup_i y δsat_i), y las diferencias entre ambas series de temperaturas (Δssi), representan (resultados en conjunto) la señal de lluvia a través de diferentes dispositivos de medición y con un margen muy cercano entre ambos tipos de datos, tal como se demostró. Este especial comportamiento permite el empleo de uno u otro sistema de medición para la observación y estimación de la ocurrencia del fenómeno, obteniendo alta certidumbre.

En este sentido, la disponibilidad de mediciones meteorológicas en superficie es accesible en mayor grado que las mediciones indirectas a partir de imágenes de satélite en tiempo real, por lo cual los patrones de 12 horas de temperaturas promedio, previas a la ocurrencia de lluvia, cobertura nubosa de parcial a completa y las ecuaciones de las

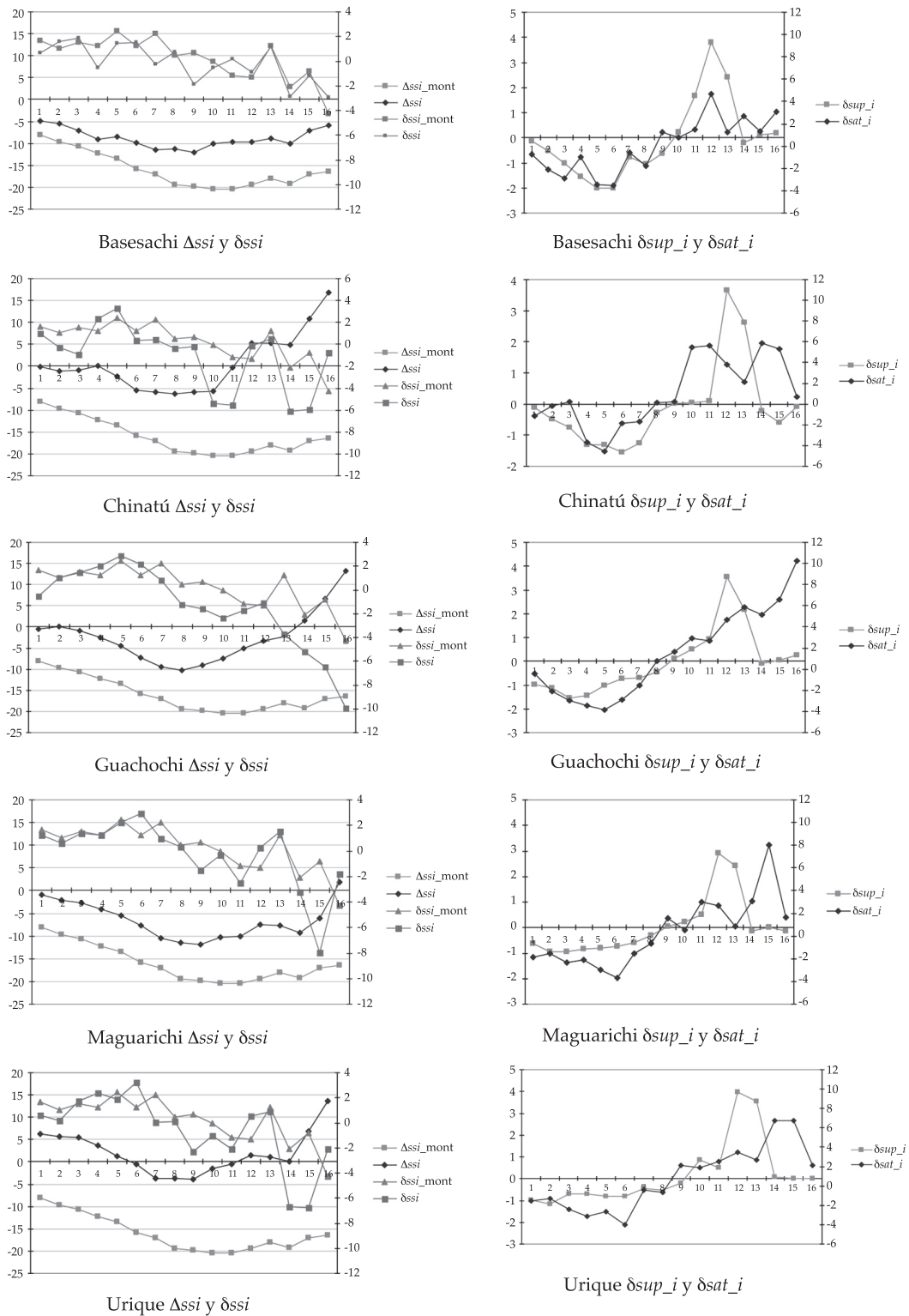


Figura 10. Curvas Δssi (diferencias de temp entre sup y sat) y curvas δssi (cambios propios de las diferencias en el tiempo), tormentas fuertes. Curvas δsat_i (evolución de los cambios de temperaturas en sat) y curvas δsup_i (evolución de los cambios de temperaturas en sup), zona montaña y zonas parciales, tormentas moderadas.

tendencias de humedad relativa relacionadas con cada una de las EMA usadas en este estudio son herramientas que pueden emplearse con éxito en la estimación de la ocurrencia de tormentas fuertes y moderadas en los meses de julio dentro de las zonas parciales montañosas. La correlación entre temperaturas y humedades relativas es 0.996 y 0.989, respectivamente, de las tormentas moderadas y fuertes. Estas ecuaciones se presentan en las figuras 11 y 12.

Aplicación de patrones de temperaturas en la estimación del rango de lluvia

Con el propósito de mostrar el ajuste de los patrones de temperaturas y humedades relativas antecedentes, obtenidos para la estimación del rango de precipitación en las diferentes regiones de estudio, fueron seleccionadas tormentas no incluidas en el análisis con imágenes de satélite, que además estuvieran conformadas dentro de la muestra de tormentas registradas por las EMA. De esta manera se extrajeron los registros de dos tormentas registradas por la EMA Basesachi (cuadro 8) y se graficaron los valores de temperaturas de 12 horas previas a los eventos de lluvia sobre las curvas de tendencia promedio y límites estimados de temperaturas de Basesachi. Se procedió de la misma manera con los datos de humedades relativas (figura 13). Los valores de la tormenta 05/07/2000 ajustaron en un 90% a las tendencias antecedentes en cuestión. En el caso de la tormenta 22/07/2001, el ajuste fue de 85%.

Estos ajustes encontrados son aceptables dentro del contexto de esta primera aproximación del estudio realizado. Tales resultados indican que las variables de temperatura y humedad relativa de dichas tormentas en efecto presentan patrones de comportamiento correspondientes a eventos de lluvia en el rango de tormentas fuertes de 20 a 50 mm, obtenidos de una manera sencilla, con base en registros en superficie, con antelación de 12 horas. Por otro lado, se seleccionó una

tercera tormenta con la finalidad, adicional a la mencionada antes, de permitir la comparación de la estimación de la precipitación basada en imágenes IR con la estimación indirecta, a través de las tendencias antecedentes. Esta tormenta se denominó 04/07/2004. Sus variables Temp y HR se graficaron sobre las curvas de las tendencias; el ajuste observado fue del 75%.

La estimación de lluvia basada en imágenes IR para esta misma tormenta se realizó de acuerdo con el procedimiento descrito en Arellano *et al.*, (2010), correspondiente a una adecuación-simplificación del método auto-estimador (Vicente, Scofield, & Menzel, 1998). En la figura 14 se presenta la lluvia estimada para la zona-montaña y el detalle de la distribución espacial de lluvia en la sección de Basesachi.

Conclusiones

La amplia extensión de la zona de estudio implica importantes variaciones espaciales del relieve. Este comportamiento se vio reflejado en los resultados de comparación de los acoplamientos entre patrones meteorológicos antecedentes a tormentas basados en temperaturas superficiales promedio y temperaturas máximas de nubes frías obtenidas de imágenes de satélites para 10 tormentas fuertes y 10 moderadas, respectivamente. Los mejores C_v entre tales series mencionadas fueron los más precisos, resultando de 0.835 y -0.812, respectivamente, a eventos fuertes y moderados. Para el acoplamiento se usaron las series de temperaturas promedio en superficie debido a que presentaron un alto coeficiente de correlación con los registros de humedades relativas de -0.996 y -0.989 mutuamente a tormentas moderadas y fuertes, así como también a que la variable obtenida de las mediciones satelitales era temperatura.

Como se mencionó, el C_v de variación promedio entre ambos tipos de series de tiempo fue de 0.835 para tormentas fuertes y de -0.812 sobre tormentas moderadas,

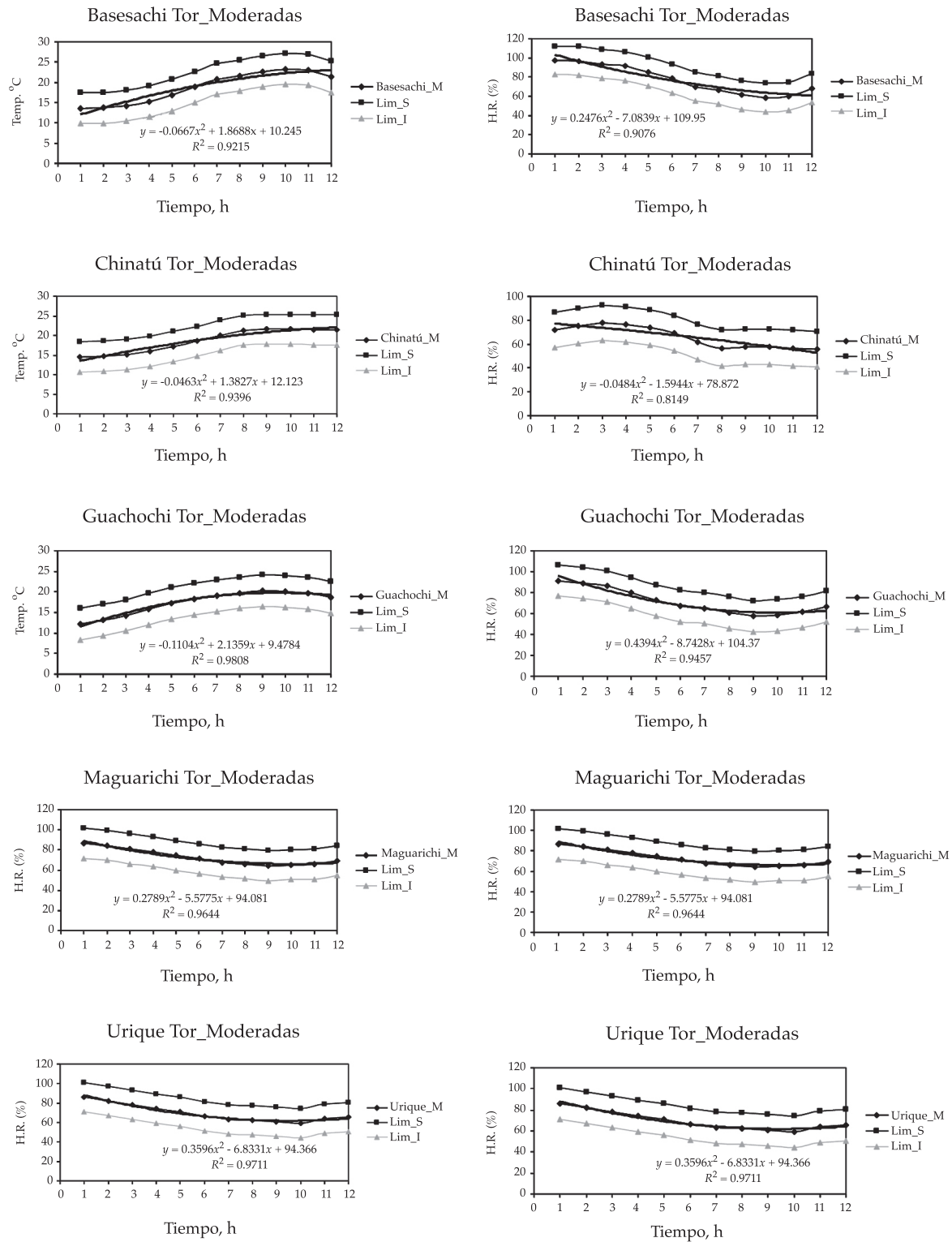


Figura 11. Ecuaciones de los patrones de temperaturas y de humedades relativas en superficie, 12 horas previas. Tormentas moderadas.

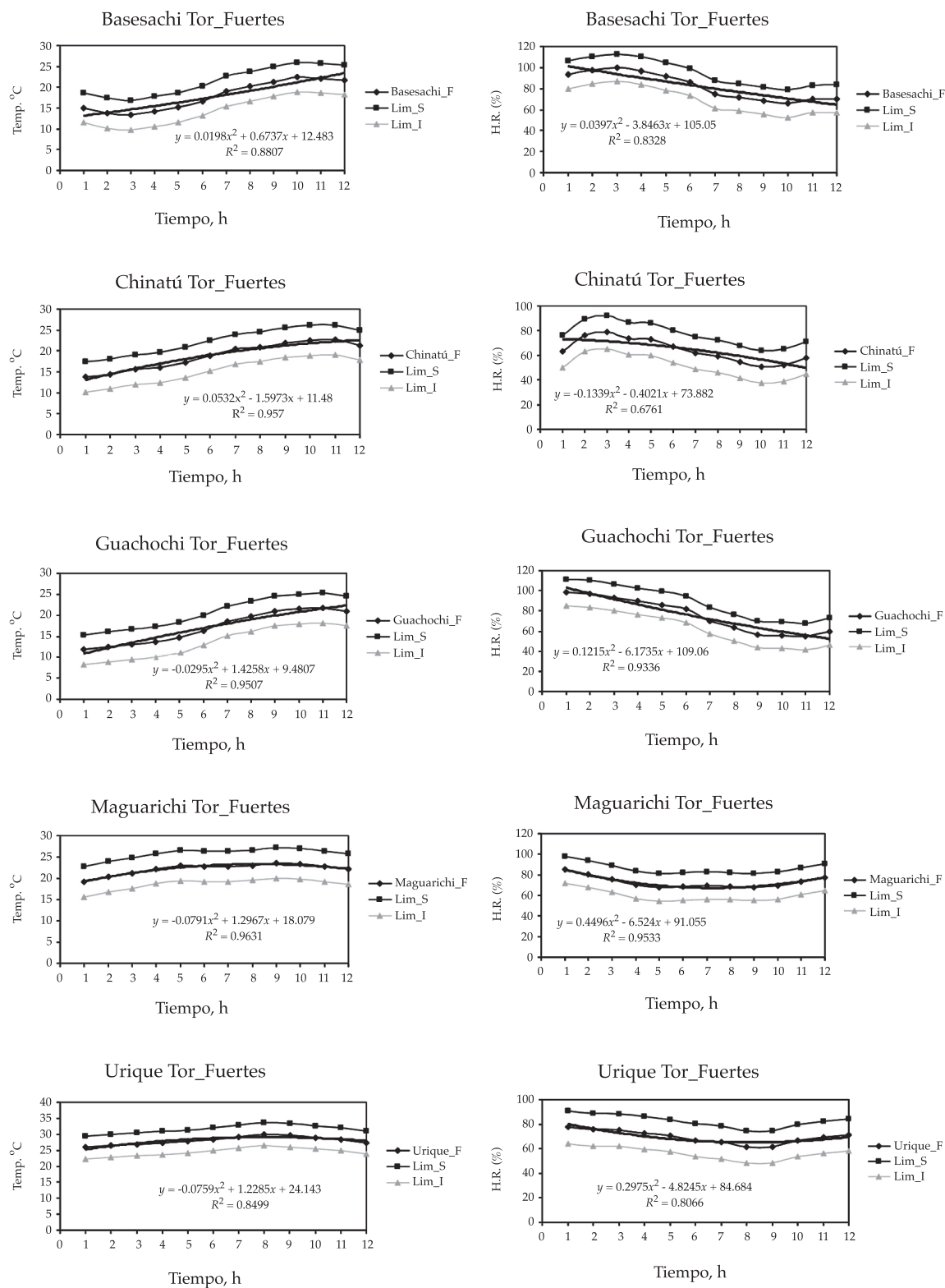


Figura 12. Ecuaciones de los patrones de temperaturas y de humedades relativas en superficie, 12 horas previas. Tormentas fuertes.

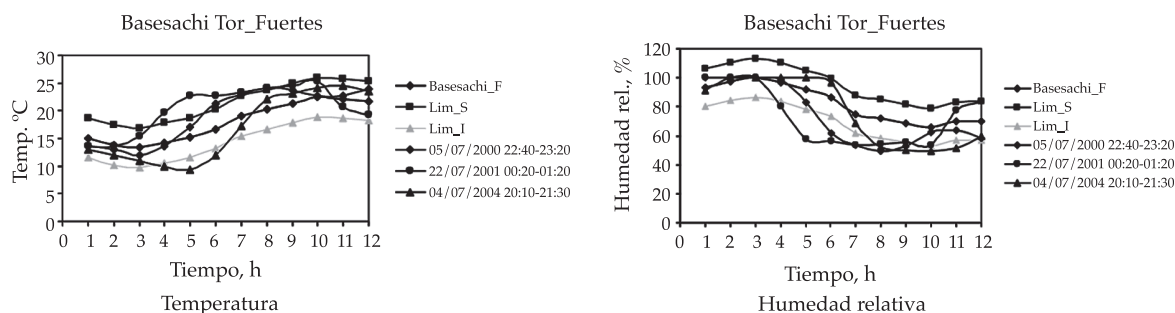


Figura 13. Curvas de los patrones de temperaturas y de humedades relativas en superficie. Tormentas de prueba.

Cuadro 8. Tormentas de prueba de tendencias antecedentes.

Tormenta (día y hora)	Lámina (mm)
05/07/2000 22:40 - 23:20	37.58
22/07/2001 00:20 - 01:20	27.92
04/07/2004 20:10 - 21:30	20.05

despreciando extensiones superficiales. Sin embargo, el empleo de las zonas de influencia para las estaciones meteorológicas en lugar de la zona de montaña disminuyó notablemente las dispersiones entre las tendencias de estas temperaturas desde un 20% hasta un 80% cerca de la hora número 10 de las series de tiempo en tormentas fuertes, y hasta un 70% para el caso de tormentas moderadas. Es decir, que el acoplamiento de mediciones aplicado a las zonas de influencia derivó en una mejoría en las relaciones entre tales series. Estos resultados se observan en las curvas Δ_{ssi} y curvas δ_{ssi} , para tormentas fuertes y moderadas.

Otros parámetros empleados para evaluar el acoplamiento entre ambos tipos de temperaturas antecedentes fueron los valores de las curvas δ_{sup_i} y δ_{sat_i} , donde la evolución de los cambios de temperaturas internas a cada una de las series mostró tendencias bastante semejantes en las primeras 9 horas de las series correspondientes a las tormentas fuertes y en las 10 horas iniciales a las respectivas series de tormentas moderadas. De esta manera, la

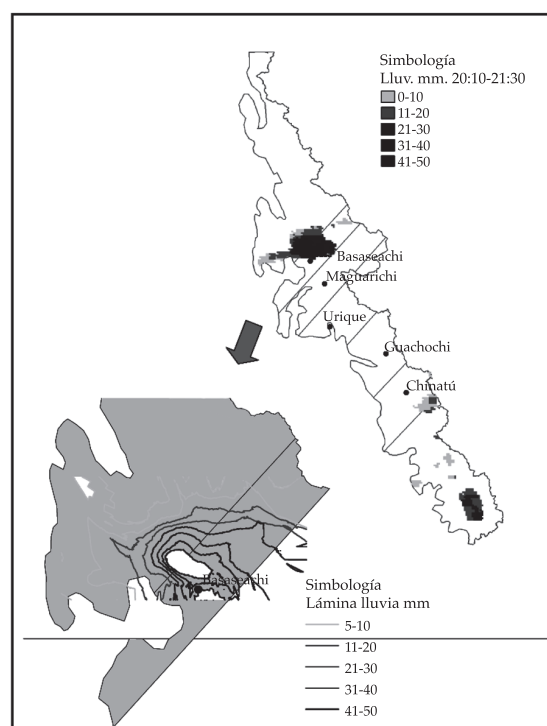


Figura 14. Distribución espacial de lluvia estimada para la tormenta 04/07/2004.

diferencia entre las series C_v calculadas para las series de temperaturas promedio en superficie y series de temperaturas máximas de satélite es de 0.066 ± 0.04 promedio para tormentas fuertes y -0.078 ± 0.064 para tormentas moderadas.

De esta manera, demostrada la alta relación entre las series de temperaturas superficiales y de satélite antecedentes a la ocurrencia de

lluvia presentada para eventos de tormentas tanto fuertes como moderadas en la zona de estudio permite la aplicación de las tendencias en el tiempo de temperaturas superficiales, en combinación con las respectivas curvas de humedades relativas, ambas asociadas con las zonas de influencia de las EMA localizadas en el sitio y con la nubosidad, la estimación del potencial de lámina de precipitación durante los meses de julio, con un horizonte de 12 horas de previsión. Asimismo, las formulaciones en cuestión son susceptibles de ser incorporadas de manera exitosa a un sistema de alerta de tormentas en tiempo real.

Agradecimientos

Agradecemos al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) por el suministro de las imágenes de satélite empleadas en la investigación, así como a los doctores Michael Weinreb y Dejianh Han, investigadores de la NOAA.

Referencias

- Adler, R. F., & Negri, A. J. (1988). A Satellite Infrared Technique to Estimate Tropical Convective and Stratiform Rainfall. *J. Appl. Meteor.*, 27(30), 30-51.
- Arellano, L. F., Gutiérrez, L. A., & Arellano, L. H. (2010). Comportamiento de tormentas extremas de Querétaro en base a imágenes de satélite. Casos de estudio. *Extensión Nuevos Tiempos, Universidad Autónoma de Querétaro*, 17, 39-46.
- Arkin, P. A. (1979). The Relationship between Fractional Coverage of High Cloud and Rainfall Accumulations during GATE over the B-Scale Array. *Mon. Wea. Rev.*, 107, 1382-1387.
- Barret, E. C. (1970). The Estimation of Monthly Rainfall from Satellite Data. *Mon. Wea. Rev.*, 98, 322-327.
- Barrett, E. C. & Martin, D. W. (1981). *The Use of Satellite Data in Rainfall Monitoring* (340 pp.). London: Academic Press.
- Carn, M. (1994). *Apport de la Télédétection Satellitaire à la Pluviométrie de Bassin d'un Fleuve Sahélien: Le Sénégal. Validation Problems of Rainfall Estimation Methods by Satellite in Intertropical Africa*. Paris: B. Guillot (Ed.), Orstom Éditions, Collection Colloques et Séminaires.
- Cenapred (2013). *Publicaciones. Características e impactos socioeconómicos de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana*. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Recuperado de www.cenapred.gob.mx.
- Dittberner, G. J., & Vonder Haar, T. H. (1973). Large Scale Precipitation Estimates using Satellite Data; Application to the Indian Monsoon. *Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. B.*, 21, 317-334.
- Feidas, H., Lagouvardos, K., Kotroni, V., & Cartalis, C. (2005). Application of Three Satellite Techniques in Support of Precipitation Forecasts of a NWP Model. *International Journal of Remote Sensing*, 26(24), 5393-5417.
- Feidas, H., Kokolatos, G., Negri, A., Manyin, M., Chrysoulakis, N., & Kamarianakis, Y. (2008). Validation of an Infrared-Based Satellite Algorithm to Estimate Accumulated Rainfall over the Mediterranean Basin. *Theo. Appl. Clim.*, 95, 91-109.
- Griffith, C. G., Woodley, W. L., Browner, S., Teijeiro, J., Martin, M. D. W., Stout, J., & Sikdar, D. N. (1976). *Rainfall Estimation from Geosynchronous Satellite Imagery during Daylight Hours* (106 pp.). NOAA Tech. Rep. ERL 356-WMPO 7. Boulder, USA: NOAA.
- Gruber, A. (1973). *An Examination of Tropical Cloud Clusters using Simultaneously Observed Brightness and High Resolution Infrared Data from Satellites* (22 pp.) NOAA Tech. Memo. Ness 50. Washington, DC: NOAA.
- Hubert, P., & Toma, C. A. (1994). Étude des Cumulus de Pluie Sahéliens. Validation Problems of Rainfall Estimation Methods by Satellite in Intertropical Africa. Paris: B. Guillot (Ed.), Orstom Éditions, Collection Colloques et Séminaires.
- Laurent, H. (1994). *Validation des Estimations de Précipitation à Grande Échelle. Validation Problems of Rainfall Estimation Methods by Satellite in Intertropical Africa*. Paris: B. Guillot (Ed.), Orstom Éditions, Collection Colloques et Séminaires.
- Lovejoy, S., & Austin, G. L. (1979). The Delineation of Rain Areas from Visible and IR Satellite Data for GATE and Mid-Latitudes. *Atmosphere-Ocean*, 17, 77-92.
- Milford, J. R., Dugdale, G., & McDougall, V. D. (1994). *Rainfall Estimation from Cold Cloud Duration: Experience of the TAMSAT Group in West Africa. Validation Problems of Rainfall Estimation Methods by Satellite in Intertropical Africa*. Paris: B. Guillot (Ed.), Orstom Éditions, Collection Colloques et Séminaires.
- Moses, J. F. & Barrett, E. C. (1986). Interactive Procedures for Estimating Precipitation from Satellite Imagery. In *Hydrologic Application of Space Technology*. Ed. Johnson, A. I. Int. Assoc. Hydrol. Sci. Publ., 160, 25-40.
- NASA (2005). *The Importance of Understanding Clouds*. National Aeronautics and Space Administration. Available Online at <http://icp.giss.nasa.gov/education/cloudintro/>.
- NOAA (1975). *Central Processing and Analysis of Geostationary Satellite Data* (155 pp.). NOAA Tech. Memo. NESS 64, U.S. Washington, DC: Department Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration.

- Ravelo, A. C. & Santa, J. A. (2000). Estimación de las precipitaciones utilizando información satelital y terrestre en la provincia de Córdoba (Argentina). *AgriScientia*, 17, 21-27.
- Sawunyama, T., & Hughes, D. A. (2008). Application of Satellite-Derived Rainfall Estimates to Extend Water Resource Simulation Modelling in South Africa. *Water SA*, 34, 1-9.
- Scofield, R. A., & Oliver, V. J. (1977). *A Scheme for Estimating Convective Rainfall from Satellite Imagery* (47 pp.). NOAA Tech. Memo. NESS 86. Washington, DC: NOAA.
- Stout, J. E., Martin, D. W., & Sikdar, D. N. (1979). Estimating GATE Rainfall with Geosynchronous Satellite Images. *Mon. Wea. Rev.*, 107, 585-598.
- Touré, A., & N'Diaye, N. (1994). *Estimation des Pluies au Sénégal par L'approche TAMSAT. Validation Problems of Rainfall Estimation Methods by Satellite in Intertropical Africa*. Paris: B. Guillot (Ed.). Orstom Éditions, Collection Colloques et Séminaires.
- Tsonis, A. A., & Isaac, G. A. (1985). On a New Approach for Instantaneous Rain Area Delineation in the Midlatitudes using GOES Data. *J. Climate Appl. Meteor.*, 24, 1208-1218.
- Vicente, G. V., Scofield, R. A., & Menzel, W. P. (1998). The Operational GOES Infrared Rainfall Estimation Technique. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 1883-1898.
- Weinreb, M. P., Jamieson, M., Fulton, N., Chen, Y., Johnson, J. X., Bremer, J., Smith, C., & Baucom, J. (1997). Operational Calibration of Geostationary Operational Environmental Satellite-8 and -9 Imagers and Sounders. *Applied Optics*, 36, 6895-6904.
- Wylie, D. P. (1979). An Application of a Geostationary Satellite Rain Estimation Technique to an Extratropical Area. *J. Appl. Meteor.*, 18, 1640-1648.

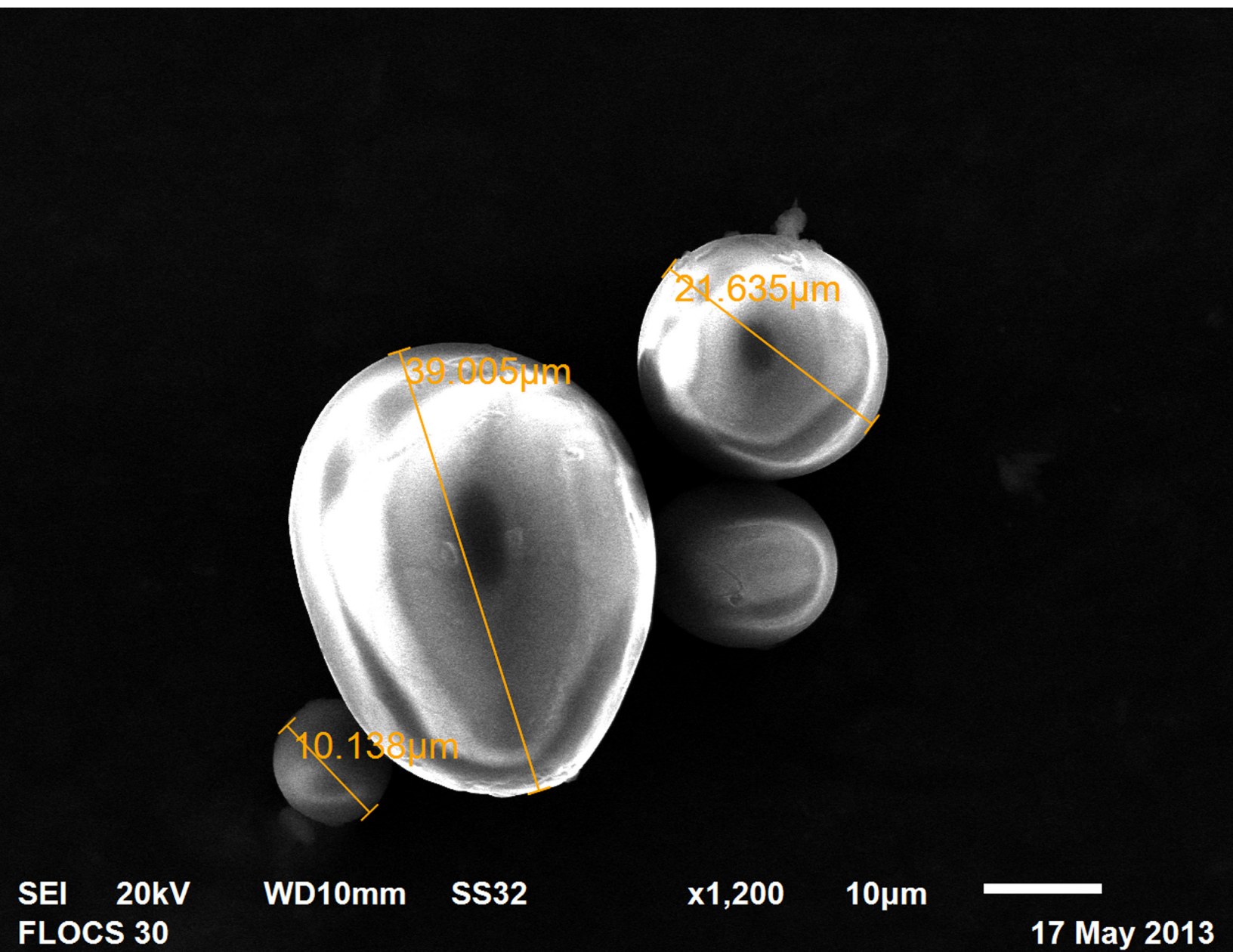
Dirección institucional de los autores

Dra. Fabiola Arellano-Lara
Dr. Carlos Escalante-Sandoval

Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
Av. Universidad 3000, Delegación Coyoacán, Ciudad Universitaria
04510 México, D.F., México
fabi_arelara@yahoo.com.mx
caes@unam.mx



Haga clic aquí para escribir al autor



Flocs de comida para peces vistos por microscopía electrónica de barrido (SEM).

Foto proporcionada por Juan Antonio García Aragón.

Criterios hidrodinámicos para el diseño de sistemas de recirculación en acuicultura

• Juan A. García-Aragón* • Humberto Salinas-Tapia • Víctor Díaz-Palomarez •
• Boris M. López-Rebollar • Javier Moreno-Guevara •
• Leonarda M. Flores-Gutiérrez •

Universidad Autónoma del Estado de México

*Autor de correspondencia

Resumen

García-Aragón, J. A., Salinas-Tapia, H., Díaz-Palomarez, V., López-Rebollar, B. M., Moreno-Guevara, J., & Flores-Gutiérrez, L. M. (septiembre-octubre, 2014). Criterios hidrodinámicos para el diseño de sistemas de recirculación en acuicultura. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(5), 63-76.

Con el objetivo de hacer más eficiente el uso del agua se ha desarrollado la técnica de sistemas cerrados de recirculación de agua (SRA) para acuicultura. Un aspecto que se ha relegado, en cuanto a los estudios de calidad de agua y biológicos, es el relativo a la hidrodinámica de esos tanques de recirculación. En este trabajo se describe una investigación experimental llevada a cabo en un modelo en plexiglass a escala reducida de dichos tanques de recirculación. En un tanque circular se utilizó comida para peces; los flóculos resultantes sirvieron de trazadores para establecer las características de sedimentación. Por medio de técnicas ópticas, velocimetría por imágenes de partículas (PIV), se pudo determinar una distribución óptima de difusores para lograr diferentes velocidades en el tanque, a fin de facilitar los procesos de floculación y, a su vez, los de sedimentación. Igualmente se propone un diseño del sedimentador central en función de las características de los flóculos y de su comportamiento hidrodinámico, en especial su velocidad de caída. Para calcular las velocidades de caída de los flóculos se utilizó la técnica de velocimetría por rastreo de partículas (PTV). Los resultados experimentales permitieron calibrar un modelo matemático de velocidades de caída de flóculos.

Palabras clave: acuicultura, SRA, flóculos, PIV, PTV, velocidades de caída.

Abstract

García-Aragón, J. A., Salinas-Tapia, H., Díaz-Palomarez, V., López-Rebollar, B. M., Moreno-Guevara, J., & Flores-Gutiérrez, L. M. (September-October, 2014). Hydrodynamic Criteria to Design Water Recirculation Systems for Aquaculture. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(5), 63-76.

Closed water recirculation systems (WRS) have been developed for aquaculture in order to more efficiently use water. In terms of water quality and biological studies, the hydrodynamics of recirculation tanks is an aspect that has been least studied. The work herein describes an experimental investigation carried out with a reduced-scale plexiglass model of these tanks. Fish food was used in one tank in which the resulting flocs served as tracers to determine sedimentation characteristics. Using optical techniques $\frac{3}{4}$ particle image velocimetry (PIV) $\frac{3}{4}$ it was possible to determine the optimal distribution of diffusers to obtain different velocities in the tank in order to facilitate the flocculation and sedimentation processes. A design for a central settling basin is also proposed based on the characterization of the flocs and their hydrodynamic behavior, particularly the fall velocity. Particle trace velocimetry (PTV) was used to calculate the fall velocity of the flocs. The experimental results enabled calibrating a mathematical model for fall velocities of flocs.

Keywords: aquaculture, WRS, flocs, PIV, PTV, settling velocity.

Recibido: 07/11/12
Aceptado: 29/01/14

Introducción

Una alternativa para el cultivo de peces en zonas con escasez de agua es el uso de sistemas cerrados de recirculación de agua SRA (Wheaton, 1977),

cuya característica principal es el reúso y ahorro del vital líquido. Estos sistemas están equipados con una serie de módulos de tratamiento de agua para mantener su calidad en niveles adecuados para su reúso y supervivencia de

los peces (Wheaton, 1977; Gallego-Alarcón, 2010). Si bien se ha podido reducir el uso de grandes volúmenes de agua con los SRA, la mayoría de los estudios se enfoca en la calidad del agua y en las condiciones de supervivencia de los peces desde el punto de vista biológico (Gallego-Alarcón, 2010) y se ha descuidado el estudio hidrodinámico de los tanques de cultivo (tanques de recirculación). Estos son la unidad principal para el desarrollo de los peces y la sedimentación de sólidos, producto de las excretas de los peces y del alimento no consumido, provocando contaminación del agua con niveles altos de nitritos y nitratos.

El principal problema que presentan los tanques de recirculación en acuicultura es la baja eficiencia en la remoción de sólidos en suspensión debido a que tienen tamaños menores a los 70 micrones, por lo cual se consideran sedimentos cohesivos (Droppo, 2001) y sólo sedimentan al agregarse. Para su pronta sedimentación, los sedimentos cohesivos deben formar flóculos o agregados compuestos de una matriz de agua, partículas inorgánicas y partículas orgánicas (Droppo & Ongley, 1994; Nicholas & Walling, 1996; Droppo, 2005), la cual depende de la velocidad de caída, siendo éste un campo abierto de investigación (García-Aragón, Droppo, Krishnappan, Trapp, & Jaskot, 2011), donde se consideren los factores que afectan la sedimentación de los flóculos, incluyendo su caracterización. Para ello es importante aplicar métodos no invasivos, que permitan identificar criterios para diseñar tanques de sedimentación con características de auto-limpieza. En la literatura científica no hay acuerdo sobre criterios de diseño adecuados para una eficiente remoción de flóculos en tanques de recirculación para acuicultura, de ahí la importancia del presente trabajo.

Los tanques más utilizados son los circulares (Watten & Beck 1987; Sommerfeld, Wilton, Roberts, Rimmer, & Fonkalrsrud, 2004). La alimentación de agua a esos tanques es por medio de difusores adheridos a la pared exterior, con la finalidad de controlar las velocidades medias tanto en la vertical

como en la transversal al tanque. La adecuada disposición de los difusores permite seleccionar la velocidad de confort del pez y, a su vez, procurar condiciones idóneas de sedimentación de partículas.

La importancia del estudio hidrodinámico en este tipo de sistemas consiste en definir las condiciones hidráulicas, principalmente las de entrada y salida del flujo, que afectan la velocidad de recirculación del agua y debido al perfil de velocidad en la vertical, la sedimentación de partículas. Si se controlan de forma adecuada estos parámetros, se puede lograr una distribución homogénea de peces que, en consecuencia, garantice el uso óptimo del volumen de agua (Duarte, Reig, Oca, & Flos, 2004) y la rápida sedimentación de los sólidos suspendidos. Además, determinando la hidrodinámica, se puede optimar la remoción de sólidos de forma natural (por sedimentación). Sin embargo, de manera experimental es complicado determinar estas condiciones con métodos invasivos, siendo necesaria la aplicación de técnicas no invasivas que permitan determinar de forma conjunta la velocidad del fluido y la velocidad de sedimentación de las partículas, sin afectar el comportamiento del flujo.

En el estudio del movimiento de fluidos en 2D se utilizan las técnicas ópticas de velocimetría por imágenes de partículas (Particle Image Velocimetry, PIV) y de velocimetría por rastreo de partículas (Particle Tracking Velocimetry, PTV) (Adrian, 1991; Salinas, 2007; Salinas-Tapia & García-Aragón, 2011), como técnicas no invasivas. Estas técnicas permiten determinar campos de velocidad de flujos en forma instantánea por medio del procesamiento de una imagen óptica grabada en dos tiempos sucesivos muy cortos. Una de las características principales de las técnicas es que utilizan partículas trazadoras para describir los patrones del flujo; por lo tanto, con su aplicación es posible entender mejor el comportamiento hidrodinámico. Una hidrodinámica adecuada permite diseñar tanques de recirculación con características de

auto limpieza y eficiencia en sedimentación de partículas.

En este estudio se determinaron los campos de velocidad del fluido y de las partículas sólidas con la aplicación de las técnicas ópticas PIV y PTV. Los datos experimentales obtenidos son valiosos científicamente, puesto que hacen falta este tipo de datos para el estudio de fases dispersas, como se enfatiza en la revisión de Sundaresan, Eaton, Koch y Ottino (2003). Esos datos permitieron determinar las características de diseño de los difusores y del sedimentador que mejor se adaptan para la remoción de partículas sólidas, así como proponer un modelo para determinar la velocidad de caída de flóculos formados por sedimentos cohesivos propios de tanques de acuicultura.

Se cuenta con experiencia en el manejo de las técnicas PIV y PTV (Salinas-Tapia & García-Aragón, 2011) en determinar la velocidad de caída (sedimentación) de partículas no cohesivas. Por lo tanto, en el presente proyecto se utilizó la técnica de PIV y PTV para determinar el campo de velocidades del fluido para diferentes configuraciones de difusores y la de PTV para determinar las velocidades de sedimentación de los flóculos.

Disposición experimental

El desarrollo de este trabajo se realizó en un modelo a escala reducida de un tanque de recirculación circular, utilizando como criterios hidrodinámicos el análisis de diferentes configuraciones de difusores (entrada de flujo) para seleccionar la más adecuada y con una alta eficiencia de remoción de sólidos del tanque. Este criterio se utilizó en combinación con el análisis del dispositivo de salida de flujo y del sedimentador central. El sedimentador consiste en dos tubos concéntricos en el centro del tanque que funcionan de acuerdo con el principio de hidrociclones (Timmons, Summerfeld, & Vinci, 1998). El tubo externo tiene ranuras en la parte inferior, las cuales permiten la entrada de agua y sedimento. El agua que ingresa por el tubo exterior asciende hasta alcanzar la máxima altura del tubo

interior, el cual funciona como un vertedor que controla el tirante y está conectado con el sistema de salida. Por otro lado, en el espacio entre ambos tubos se genera una zona de baja velocidad, lo cual permite la sedimentación de los flóculos.

Para el modelo a escala se utilizó como referencia el sistema piloto de cultivo de peces instalado en el laboratorio de modelos hidráulicos del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), el cual está diseñado a escala real para el cultivo de peces, con dimensiones de 3 m de diámetro y 1.0 m de altura, construido de mampostería, con tirantes de agua de 0.90 cm, y velocidades máximas de 30 cm/s.

La principal problemática encontrada en este tipo de tanques de cultivo es la poca eficiencia en la sedimentación de las partículas (Gallego-Alarcón, 2010); la eficiencia alcanzada por el sedimentador fue de 5.56%, muy por debajo de la reportada por investigaciones anteriores (García, 2008; Gallego-Alarcón, García, Díaz, & Fall, 2004; Gallego-Alarcón, 2004). Esta problemática justifica la evaluación de la hidrodinámica del sistema, factor importante en la sedimentación de las partículas, utilizando como criterio principal la selección y configuración de los dispositivos de entrada y salida del flujo.

Para evaluar y determinar las configuraciones correctas de entrada y salida de flujo, utilizando las técnicas de PIV y PTV, fue necesario construir un sistema a escala, aplicando las leyes de similitud dinámica y cinemática. El principal criterio utilizado para transferir los resultados de los estudios hidrodinámicos de un modelo a un prototipo es el número de Reynolds $\left(Re = \frac{uh}{\nu}\right)$ y el

número de Froude $\left(Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}}\right)$. En el cuadro

1 se resumen las propiedades geométricas, así como los parámetros hidrodinámicos del prototipo y las correspondientes al modelo utilizado para este trabajo.

Como resultado de la similitud geométrica se tiene que las escalas obtenidas son escala

de longitud, $l_e = 3.0$, y escala de velocidad, $v_e = \sqrt{3.0} = 1.73$. Es decir, que para obtener las velocidades del modelo, se necesitan dividir por 1.73 las velocidades medidas en el prototipo.

Metodología

El arreglo experimental empleado en el desarrollo de la presente investigación después de aplicar análisis dimensional al prototipo instalado en el CIRA consta de un tanque con recirculación de agua de 1.03 m de diámetro y 40 cm de altura, elaborado con plexiglás para permitir una visualización adecuada. La alimentación es por gravedad a través de los arreglos de difusores de acuerdo con tres configuraciones propuestas para evaluar la hidrodinámica del flujo; los difusores son intercambiables, lo que permite controlar el caudal y dirección, y permitió analizar el comportamiento del flujo (ver figura 1). Para este trabajo se consideró como criterio hidrodinámico tres configuraciones diferentes de difusores, correspondiente a tres caudales líquidos distintos, además se determinó la velocidad media (u_{med}) del flujo utilizando un

molinete digital con precisión de 0.1 cm/s, y con estos datos se determinó el número de Reynolds ($Re = \frac{uh}{\nu}$) y el número de Froude ($Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}}$). En el cuadro 2 se presentan los parámetros hidráulicos utilizados.

Otro criterio considerado en la hidrodinámica del tanque que de acuerdo con los resultados previos es importante en este tipo de sistemas es la selección de los dispositivos de salida de flujo, ello con la finalidad de diseñar sistemas con características de auto limpieza.

Para lograr una velocidad constante y un flujo uniforme en el sistema, la alimentación se realiza por medio de dos trenes de difusores de diámetro variable (figura 2), instalados de tal forma que se puede controlar la dirección del flujo de entrada. Para determinar las condiciones de flujo se varió la dirección de los difusores creando zonas de más alta o más baja velocidad, según se requiriera, para hacer más eficiente la remoción de los sólidos. Las configuraciones de los difusores que se privilegiaron en el presente estudio fueron tres y los datos de configuración se muestran en el cuadro 2. Cada tren consiste en cinco difusores,

Cuadro 1. Parámetros del modelo y prototipo del tanque de recirculación.

Parámetros	Prototipo	Modelo
Material de construcción	Mampostería, acabado de cemento	Acrílico
Fluido	Agua	Agua
Temperatura del agua (°C)	13° - 17°	15° - 17°
Diámetro del tanque, D (cm)	300	100
Altura del tanque, H (cm)	100	35
Diámetro del hidrociclón (cm)	85	30
Distancia radial (ancho del canal) desde la pared del tanque a la pared del hidrociclón (cm)	93	35

Cuadro 2. Distribución y tamaño de difusores.

Configuración	Diámetro del difusor (mm)	Dirección del difusor (°)					Q (l/min)
		1	2	3	4	5	
A	4.37	45	135	45	45	90	14.62
B	3.18	45	30	45	90	135	9.00
C	3.18 y 1.08	45	45	135	90	135	10.91

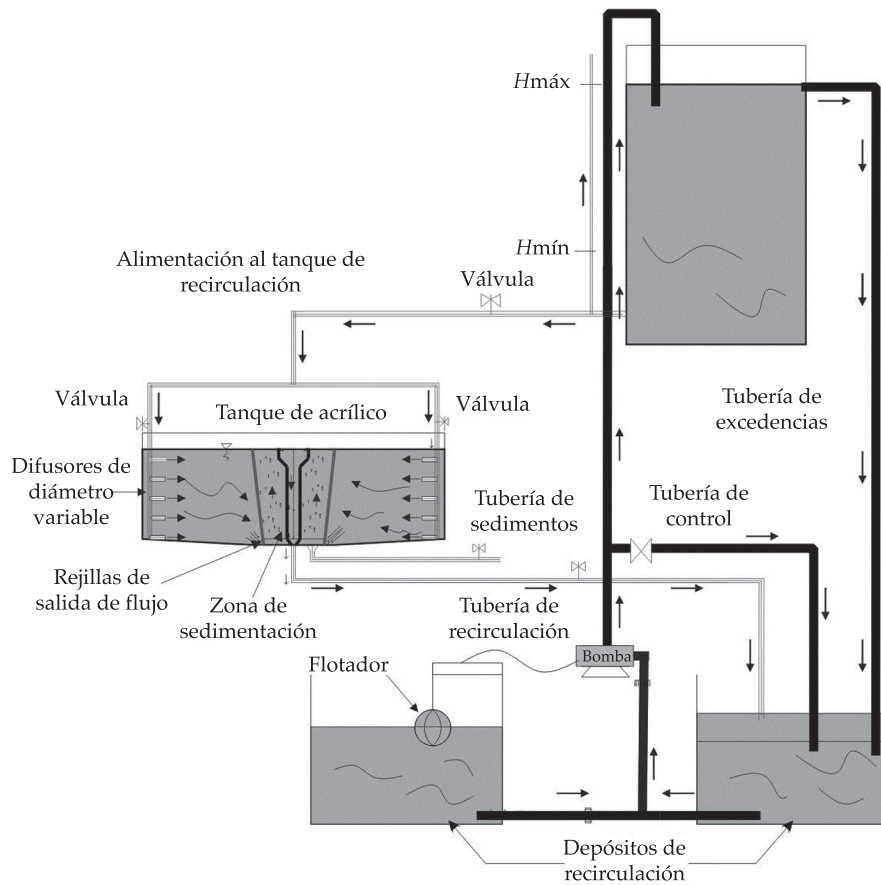


Figura 1. Disposición experimental.

donde los ángulos de dirección son medidos a partir de la tangente de la pared del tanque, siendo ésta la referencia 0° y midiendo los ángulos en el sentido de las manecillas del reloj (figura 2). En la figura 2b se puede apreciar cómo están distribuidos los difusores que generan un flujo circular en el canal.

Como dispositivo de salida se utilizó el principio de hidrociclón (Timmons *et al.*, 1998), con una modificación que permite la sedimentación de partículas. Este dispositivo consistió en dos tubos concéntricos en la parte central del tanque, donde el tubo exterior es de 30 cm de diámetro y 35 cm de altura, el cual presenta ranuras perimetrales en la parte inferior, para permitir la entrada de agua, y que ésta ascienda hasta el tubo interior de 10 cm de diámetro y 30 cm de altura; este último

conectado a una tubería de salida para su recirculación (figura 2a).

Para la instalación del sistema óptico (PIV), se utilizó una fuente de luz láser Nd:YAG de doble cavidad (doble pulsado) de 15 mJ; este equipo permitió iluminar la región de análisis (10 x 10 cm). Para la captura de imágenes se utilizó una cámara con sensor CCD de marca Lumenera (60 fps) y una cámara con sensor CCD de marca JAI (250 fps), equipadas con un lente Nikkon 50 mm, las cuales fueron sincronizadas con la fuente de luz láser, utilizando la tarjeta de sincronización NI-PCIE-1430 de National Instruments.

El desarrollo experimental consistió en dos etapas. La primera fue el desarrollo de experimentos para determinar el comportamiento hidrodinámico del tanque, donde se evalúa

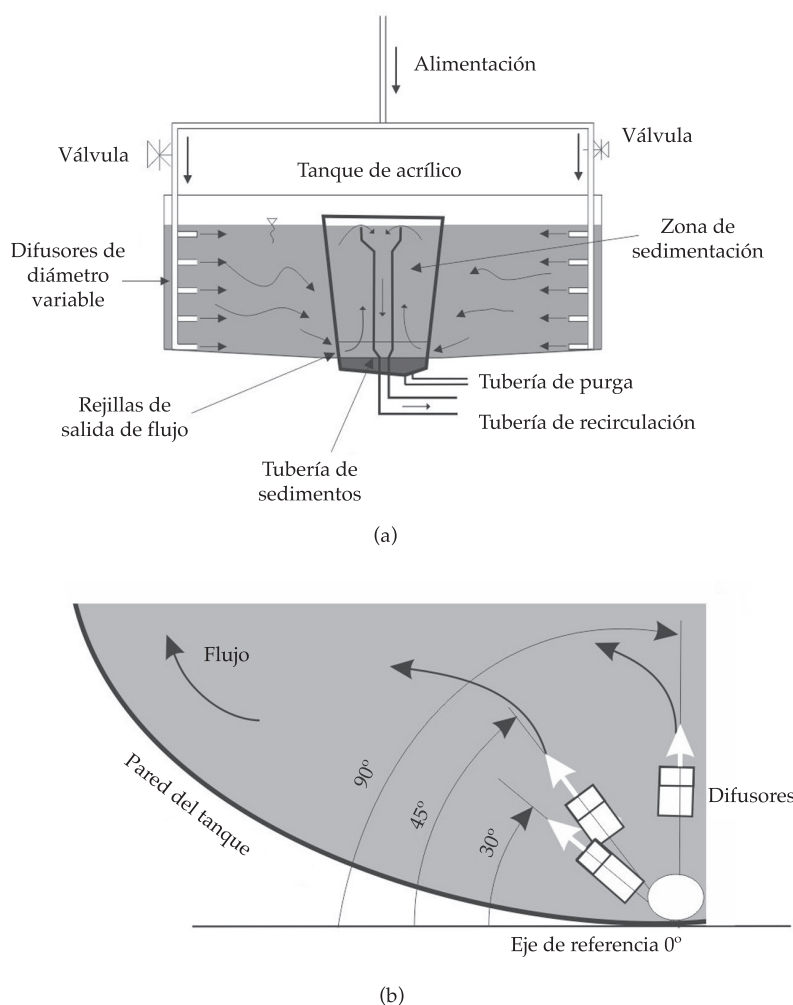


Figura 2. Ubicación de los difusores de alimentación: a) dirección de difusores, b) posición de difusores.

ron las diferentes configuraciones de entrada y salida de flujo. Se utilizaron tres diferentes caudales, tomado como referencia el rango de velocidades apropiadas para el adecuado crecimiento de los peces (Gallego-Alarcón, 2010), seleccionando aquella que presentó mejores condiciones de sedimentación de partículas. La segunda etapa consistió en determinar el comportamiento de los sedimentos que por su origen se consideran como cohesivos, para ello se determinó la velocidad de sedimentación. En esta etapa se utilizaron como sedimentos cohesivos alimento para peces empleado en tanques de acuicultura, el cual fue caracterizado, obteniendo su granulometría.

Los campos de velocidad fueron obtenidos aplicando la técnica PIV y PTV; asimismo, se calcularon los perfiles de velocidad para analizar el comportamiento del flujo, aplicando el análisis estadístico descrito en Salinas (2007). Los experimentos se realizaron considerando condiciones de flujo uniforme, empleando agua a 15 °C (viscosidad cinemática de $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) como fluido. Para eliminar impurezas, se utilizó un filtro que retiene partículas mayores a 5 μm , las cuales pudieran interferir en el procesamiento de las imágenes, en vista de que se emplearon partículas trazadoras de PSP poliamida de 25 μm de diámetro y densidad de 1.03 g/cm^3 . Mientras que para los sedimentos

se utilizó alimento para peces, el cual se tamizó para obtener tamaños de partículas menores a 75 micrones, a fin de provocar la formación de flóculos y determinar su velocidad de caída.

Para determinar los campos de velocidad tanto del fluido como de los sedimentos, se adquirieron en promedio cien imágenes por corrida con tres repeticiones por cada configuración del sistema de entrada y salida del flujo (configuraciones A, B y C), de una zona iluminada por la hoja de luz láser.

En la configuraciones A y B, ambos trenes de difusores se encontraban en lados opuestos del tanque (como en la figura 2a) y tenían el mismo diámetro; en la configuración C, los dos trenes de difusores se encontraban en el mismo lado del tanque de forma paralela; en un tren, el diámetro del difusor fue de 3.18 mm y en el otro de 1.98 mm.

Como se puede observar de las configuraciones, los difusores en la parte superior del tanque tienen direcciones de 45° o menores, con el objetivo de obtener mayores velocidades en esa zona del tanque y facilitar los procesos de floculación por velocidad diferencial. Los de la parte inferior, por el contrario, tienen ángulos de 90° o mayores, con el objetivo de reducir la velocidad en esa zona del tanque y acelerar los procesos de sedimentación.

El procesamiento de imágenes se realizó aplicando PIV, con el *software SwPIV* para la hidrodinámica del tanque, mientras que para determinar la velocidad de caída de las partículas sedimentarias se aplicó PTV, con el *software PTVsed V.1.0*, desarrollado para caracterizar partículas no esféricas y no uniformes (Salinas-Tapia, García-Aragón, Moreno, & Barrientos, 2006).

Para calcular la velocidad de caída de los flóculos se utilizó la técnica de velocimetría por rastreo de partículas (PTV), técnica ideal para determinar la velocidad de partículas dispersas en un sistema bifásico (Salinas, 2007). Para obtener la velocidad de los flóculos y del fluido fue necesario adicionar al flujo partículas trazadoras de diferente densidad a la fase dispersa, generando así un desafío para la determinación de la velocidad de las

diferentes fases (Chetverikov, Nagy & Verestóy, 2000; Guasto, Haung, & Breuer, 2005; Udrea, Bryanston-Cross, Lee, & Funes-Gallanzi, 1996). Además, cuando se trata de un sistema sólido-líquido (transporte de sedimentos), el problema es aún mayor, ya que no existe uniformidad en las partículas en su forma y diámetro, produciendo que el comportamiento sea más complejo a un flujo bifásico convencional.

Resultados

El análisis de los resultados consistió en la determinación de las velocidades de caída de los flóculos y las condiciones hidrodinámicas para que esto suceda. Igualmente se identificaron las condiciones hidrodinámicas que favorecen la remoción de sólidos. Para éstas se determinaron las características físicas óptimas del sedimentador, a fin de cumplir con la función de permitir concentraciones de sólidos adecuadas para el desarrollo de peces.

Como resultado de la aplicación de la técnica PIV se obtuvieron los campos de velocidad en 2D para cada configuración de entrada de flujo. En la figura 3 se muestran sólo los campos de velocidad correspondientes a la configuración C, la cual presentó el mejor comportamiento hidrodinámico, ya que como se observa existe una distribución variable de velocidades en todo el ancho y alto del tanque. En esta configuración C se obtuvo una velocidad máxima de 11.05 cm/s en la pared del tanque a una altura de 15 cm y una velocidad mínima de 3.75 cm/s cerca del tubo del hidrociclón exterior a una altura de 15 cm. Esto permite acelerar los contactos entre partículas en la parte alta del tanque y permite las condiciones idóneas de sedimentación de partículas en la parte baja del tanque. Este comportamiento no se logró con las configuraciones A y B.

Por otro lado, en la figura 4 se muestra una comparación de los perfiles de velocidad obtenidos para las configuraciones A, B y C. Los perfiles mostrados indican que la velocidad en el tanque es variable, lo cual no es tomado en cuenta durante el diseño convencional de un tanque. Esto depende de la configuración de los

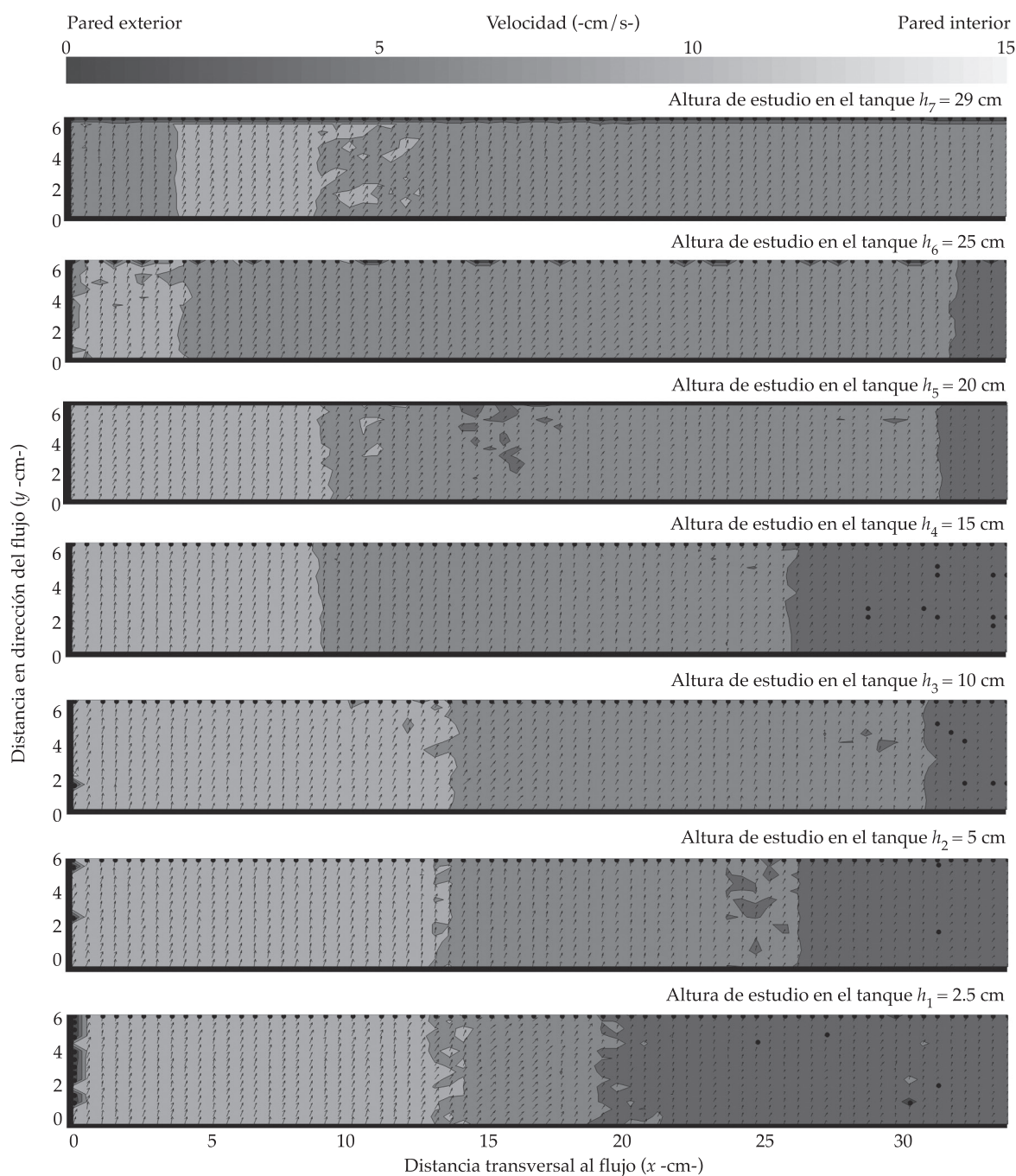


Figura 3. Campos de velocidad para la configuración C.

dispositivos de entrada de flujo, principalmente de la dirección de inyección del flujo. Este análisis espacial en 2D permitió establecer los criterios a considerar en la hidrodinámica de los tanques, los cuales son de importancia para que las partículas puedan lograr una

sedimentación eficiente y condiciones óptimas para el cultivo de peces. La clave del éxito es la distribución e instalación de los dispositivos de entrada y salida de flujo. Como se observa en la figura 4, es esencial establecer la dirección y diámetro de los difusores para garantizar las

condiciones con alta tasa de sedimentación, pero no descuidando las condiciones óptimas para un adecuado desarrollo de los peces de acuerdo con su tamaño (Gallego-Alarcón, 2010).

Un elemento importante en el diseño de los tanques, que permita la sedimentación de partículas, es el tubo exterior central. El diámetro del tubo exterior central (D_{tc}) depende del caudal suministrado Q y de las características de los sedimentos que se requiere remover, en especial de la velocidad de caída de éstos (W_s). La velocidad de ascenso en el sedimentador debe ser menor a la velocidad de caída de los sedimentos. Si el sedimentador central se compone de un tubo exterior y de un tubo interior de radio ($D_{tc}/3$), se debe cumplir lo siguiente:

$$V_{as} = \frac{Q}{\pi \frac{D_{tc}^2}{4} - \pi \left(\frac{D_{tc}}{3}\right)^2} \quad (1)$$

Si $V_{as} < W_s$, entonces se debe cumplir que:

$$D_{tc} > 1.19 \sqrt{\frac{Q}{W_s}} \quad (2)$$

La dificultad mayor es definir el valor de W_s , puesto que esa velocidad de caída no es constante, pues hay un amplio rango de sedimentos y esa velocidad de caída no sólo depende del diámetro sino de la densidad de los sedimentos cohesivos.

En esta investigación se profundizó en la definición adecuada de la velocidad de caída. Para el efecto, se calibró de manera experimental una fórmula para relacionar la densidad de los flóculos con su diámetro, el cual se midió de manera experimental utilizando la técnica PTV. En la figura 5a se muestra una imagen con partículas sedimentarias (flóculos) y se observa la variabilidad de éstos, mientras que en la figura 5b se muestra un campo de velocidad de

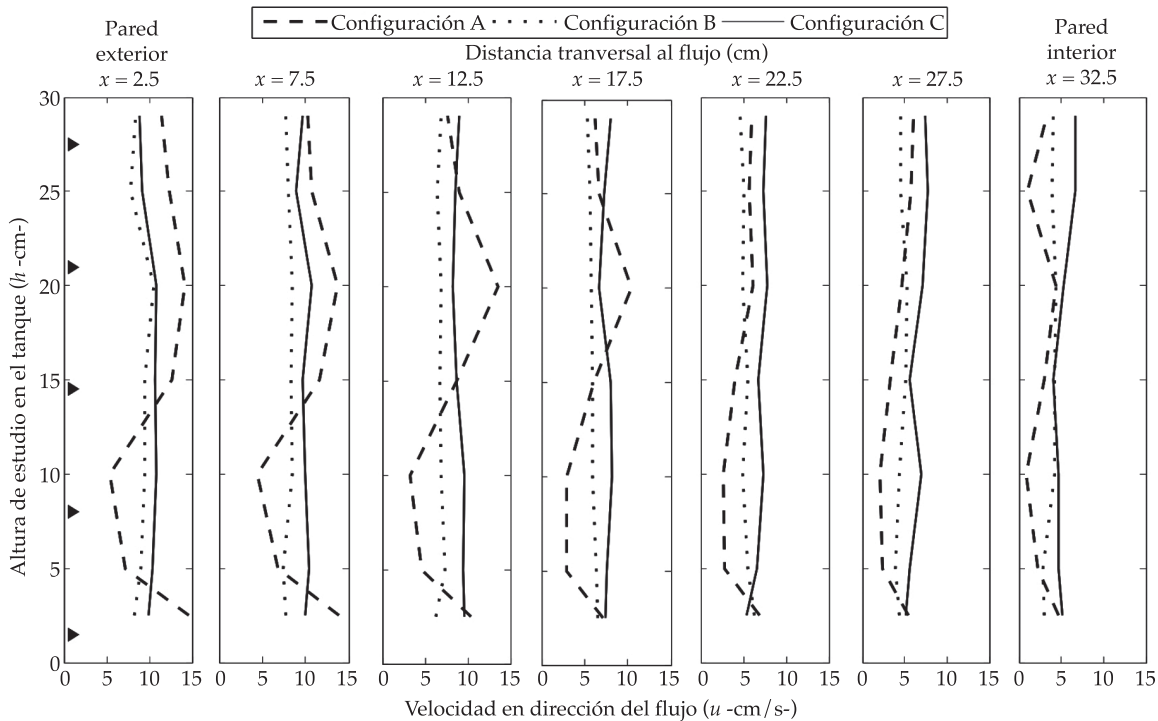


Figura 4. Comparación de los perfiles de velocidad para las distintas configuraciones (A, B y C), y a diferentes distancias en dirección transversal al flujo.

los flóculos, determinado con la técnica PTV, y se observa que existe variación.

Utilizando la fórmula propuesta por Lau y Krishnappan (1997) siguiente:

$$\rho_s - \rho_w = (\rho_p - \rho_w) \exp(-bD^c) \quad (3)$$

Donde ρ_s es la densidad del sedimento (flóculo); ρ_p , la densidad de las partículas primarias que constituyen el agregado; y b y c son dos constantes que dependen del tipo de flóculo y de la tasa de corte.

Al hacer un balance de fuerzas de sustentación y de sedimentación se obtiene que la velocidad de caída es:

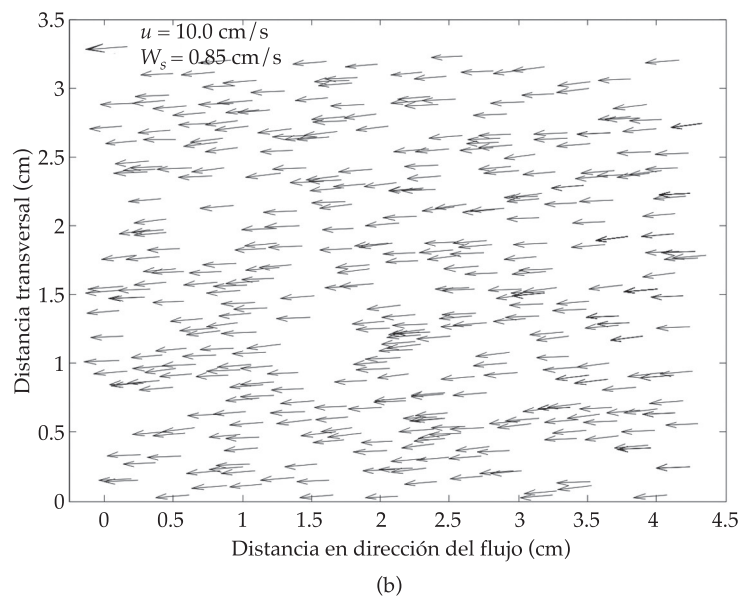
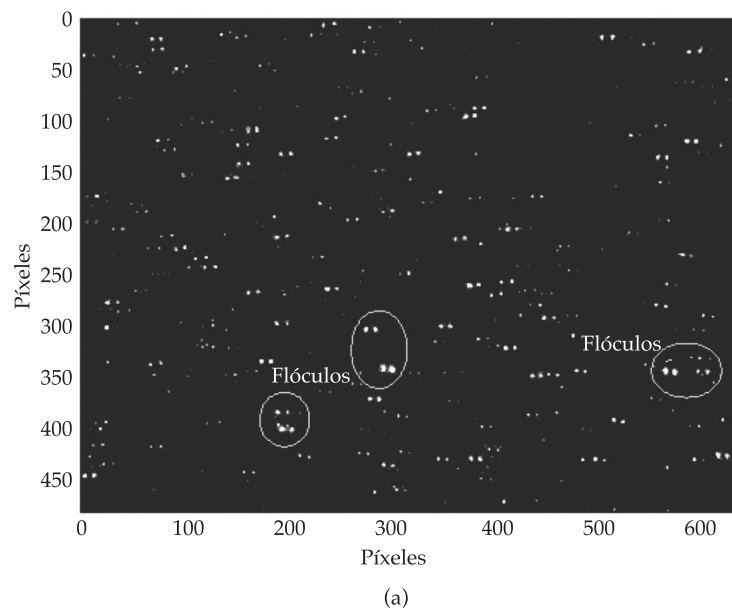


Figura 5. Aplicación de la técnica de PTV: a) imagen de partículas (flóculos); b) campos de velocidad de partículas sedimentarias (flóculos).

$$Ws^2 = \frac{4(\rho_s - \rho_w)gD}{3C_d\rho_w} \quad (4)$$

Si se reemplaza la ecuación (3) en la (4) y se define el coeficiente de arrastre como $C_d = 24/Rep$, donde $Rep = \rho_w W_s D / \mu$ y μ es la viscosidad dinámica del agua, entonces la ecuación (4) se transforma en:

$$Ws = \frac{(\rho_p - \rho_w)g \exp(-bD^c) D^2}{18\mu} \quad (5)$$

Los coeficientes b y c se calibraron utilizando el diámetro del flóculo en micrones. Sabiendo que $\mu = \rho_w \nu$, donde ν es la viscosidad cinemática del agua que a 20 °C es $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, y considerando que D está en micrones, la ecuación (5) se transforma en:

$$Ws = 5.45 \cdot 10^{-7} \left(\frac{\rho_p}{\rho_w} - 1 \right) \exp(-bD^c) D^2 \quad (6)$$

Donde D , el diámetro del flóculo, está dado en micrones y la velocidad W_s en m/s.

Con los datos experimentales se lograron determinar los valores de b y c que mejor reproducen las velocidades de caída medidas por PTV.

A continuación se presenta los mejores ajustes a la ecuación (6) con los datos experimentales de flóculos, producto de comida para peces de diámetro entre 20 y 150 micrones, con densidad media de $1\,430 \text{ kg/m}^3$.

Se tomaron imágenes cada cinco minutos para experimentos de duración cercana a una hora. Se muestran algunos de los datos ajustados con la ecuación (6). En las figuras 6 y 7 se observa que los datos obtenidos de la velocidad de caída de los flóculos obtenidos de forma experimental con PTV se ajustaron adecuadamente a la ecuación (6), con valores de $b = 0.0037$ y $c = 1.1$. Además, se puede apreciar que existió proceso de floculación, ya que aunque los diámetros de las partículas

primarias eran menores a 75 micrones; del resultado del análisis de las imágenes se obtuvieron diámetros mayores a 300 micrones.

Así, la ecuación resultante para calcular la velocidad de caída de los sedimentos provenientes de comida para peces es la siguiente (7), la cual puede ser utilizada para el diseño de tanques de recirculación con características de auto limpieza para su uso en la acuicultura, no descuidando la selección del sistema de entrada y salida del flujo, donde se considera una densidad de las partículas primarias de $2\,650 \text{ kg/m}^3$.

$$Ws = 9 \cdot 10^{-7} D^2 \exp(-0.0037 D^{1.1}) \quad (7)$$

En la cual W_s está en m/s y D en micrones.

Conclusiones

Utilizando un modelo a escala de un tanque de recirculación para acuicultura y comida para peces se lograron optimar las variables que rigen el funcionamiento de un tanque de recirculación para acuicultura. Por medio de la técnica óptica PIV se lograron determinar las características de flujo y distribución de los difusores para lograr una adecuada hidrodinámica en el tanque, que permita los procesos de floculación y los de sedimentación. Por medio de la técnica óptica de PTV se logró proponer una fórmula para determinar las características del sedimentador central que proporcione una mayor remoción de sedimentos.

Se pudo comprobar que el diámetro óptimo del sedimentador depende de la velocidad de caída de los sedimentos presentes en el tanque (ecuación (2)). La mayor dificultad consiste en estimar de manera adecuada esa velocidad de caída. En esta investigación se utilizaron técnicas ópticas avanzadas como PIV y PTV, que permitieron calibrar una fórmula para estimar esa velocidad de caída en función de las características físicas del sedimento y de

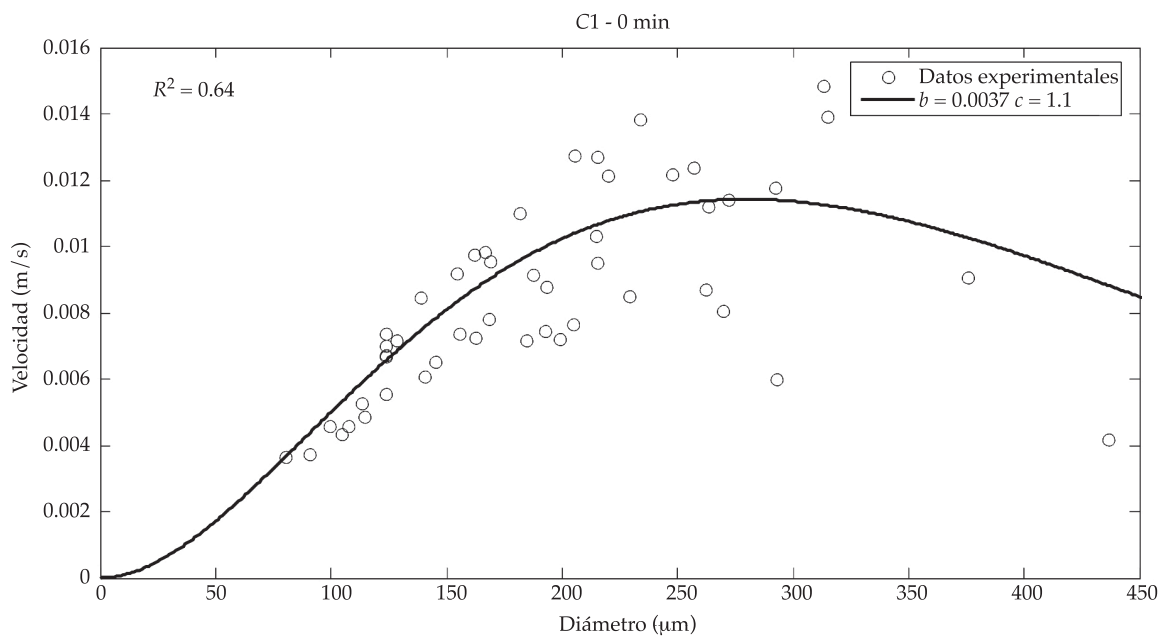


Figura 6. Resultados experimentales para velocidades de caída de sedimentos, $t = 5$ minutos.

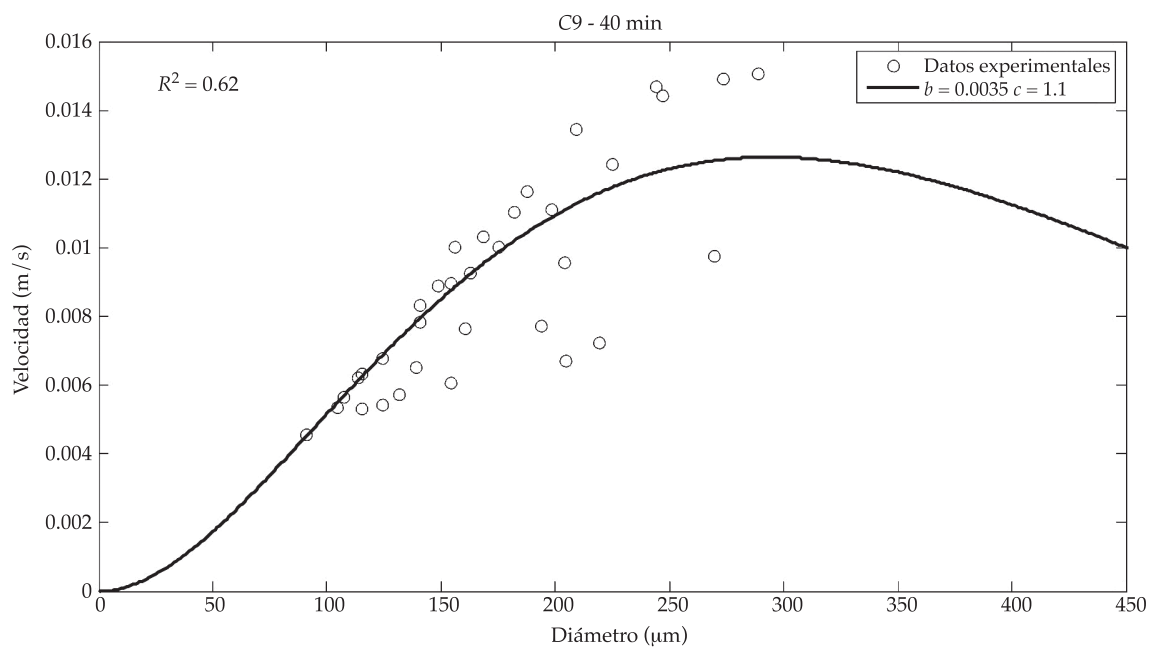


Figura 7. Resultados experimentales de velocidades de caída de sedimentos y ajuste para $t = 40$ minutos.

la hidrodinámica del tanque de recirculación (ecuación (7)).

Con los resultados obtenidos de las diferentes configuraciones de entrada y salida de flujo y con la aplicación de las técnicas ópticas de PTV y PIV para determinar los campos de velocidad, se lograron establecer criterios hidrodinámicos a considerar en el diseño de este tipo de tanques; éstos se refieren a las condiciones de entrada y salida de flujo, que afectan la distribución en la vertical de la velocidad del fluido y las velocidades de sedimentación de los flóculos.

Referencias

- Adrian, R. J. (1991). Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 23, 261-304.
- Chetverikov, D., Nagy, M., & Verestóy, J. (2000) Comparison of Tracking Techniques Applied to Digital PIV. *Proc. 15th ICPR*, Barcelona, Spain.
- Droppo, I. G., & Ongley, E. D. (1994). Flocculation of Suspended Sediment in Rivers of Southeastern Canada. *Water Research*, 28, 1799-1809.
- Droppo, I. G. (2001). Rethinking what Constitutes Suspended Sediment. *Hydrological Processes*, 14, 653-667.
- Droppo, I. G. (2005). Suspended Sediment Transport-Flocculation and Particle Characteristics. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. M. G. Anderson (Ed.). New York: John Wiley & Sons, Ltd.
- Duarte, S., Reig, L., Oca, J., & Flos, R. (October, 20-23, 2004). Computerised Imaging Techniques for Fish Tracking in Behavioural Studies. *Biotechnologies for Quality. Proceedings of the European Aquaculture Society* (pp. 310-311). Vol. 34. EAS Special Publication. Barcelona, Spain.
- Gallego-Alarcón, I. (2010). *Evaluación y modelación de un tren de tratamiento de agua residual acuícola con recirculación y del cultivo de trucha arco-iris alimentado por cosecha pluvial*. Tesis de doctorado en Ciencias del Agua. Toluca, México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Gallego-Alarcón, I. (2004). *Diseño y evaluación de un sistema prototipo para el tratamiento de agua residual acuícola con reúso de agua en el cultivo de Oncorhynchus mykiss en la fase alevín-juvenil*. Tesis de maestría. Toluca, México: CIRA, Facultad de Ingeniería, UAEM.
- Gallego-Alarcón, I., García, D., Díaz, C., & Fall, C. (2004). Production of Juveniles of *Oncorhynchus mykiss* Using an Aquaculture Water Treatment Plant. En: Adams S. & J. Olafsen (Eds.). *Biotechnologies for Quality* (884 pp.). Bruselas: EAS.
- García, P. D. (2008). *Evaluación de un sistema prototipo integral de cultivo de trucha con tratamiento y reciclado del efluente*. Tesis de Doctorado. Toluca, México: CIRA, Facultad de Ingeniería, UAEM.
- García-Aragón, J., Droppo, I., Krishnappan, B., Trapp, B., & Jaskot, C. (2011). Experimental Assessment of Athabasca River Cohesive Sediment Deposition Dynamics. *Water Quality Research Journal of Canada*, 46(1), 87-96.
- Guasto, J. S., Haung, P., & Breuer, K. S. (November, 5-11, 2005). Statistical Particle Tracking Velocimetry Using Molecular and Quantum Dot Tracer Particles. *Proceedings of IMECE 2005-80051*, Orlando, Florida, USA.
- Lau, Y. L., & Krishnappan, B. G. (1997). Measurement of Size Distribution of Settling Flocs. NWRI. Publication No. 97-223. Ontario: National Water Research Institute, Environment Canada, Burlington.
- Nicholas, A. P., & Walling, D. E. (1996). The Significance of Particle Aggregation in the Overbank Deposition of Suspended Sediment on River Floodplains. *Journal of Hydrology*, 186, 275-293.
- Salinas-Tapia, H., García-Aragón, J. A., Moreno, D., & Barrientos, G. B. (2006). *Particle Tracking Velocimetry (PTV) Algorithm for Non-Uniform and Nonspherical Particles* (pp. 322-327). Vol. II. Cuernavaca, México: CERMA.
- Salinas, T. (2007). *Determinación de parámetros para flujo bifásico (sólido-líquido) por medio de técnicas ópticas*. Tesis de doctorado en Ingeniería. Toluca, México: Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería, UAEM.
- Salinas-Tapia, H. & García-Aragón, J. A. (2011). Fórmula experimental para determinar la velocidad de caída de sedimentos en flujo transversal. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(2), 175-182.
- Sundaresan, S., Eaton, J., Koch, D., & Ottino, J. (2003). Appendix 2: Report of Study Group on Disperse Flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 29, 1069-1087.
- Timmons, M. B., Summerfeld, S. T., & Vinci, B. J. (1998). Review of Circular Tank Technology and Management. *Aquacultural Engineering*, 18, 51-69.
- Udrea, D. D., Bryanston-Cross, P. J., Lee, W. K., & Funes-Gallanzi, M. (1996). Two Sub-Pixel Processing Algorithms for High Accuracy Particle Centre Estimation in Low Seeding Density Particle Image Velocimetry. *Optics. & Laser Tech*, 28, 389-396.
- Sommerfelt, S. G., Wilton, G., Roberts, D., Rimmer, T., & Fonkalrsrud, K. (2004). Developments in Recirculating Systems for Artic Char Culture in North America. *Aquacultural Engineering*, 30, 31-71.
- Watten, B. J., & Beck, L. T. (1987). Comparative Hydraulics of Rectangular Cross Flow Rearing Unit. *Aquaculture Engineering*, 6, 127-140.
- Wheaton, F. W. (1977). *Aquaculture Engineering* (708 pp.). New York: Wiley-Interscience.

Dirección institucional de los autores

Dr. Juan A. García-Aragón

Dr. Humberto Salinas-Tapia

M.C.A. Víctor Díaz-Palomarez

Ing. Boris M. López-Rebollar

Ing. Javier Moreno-Guevara

Ing. Leonarda M. Flores-Gutiérrez

Centro Interamericano de Recursos del Agua

Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM)

Cerro de Coatepec, CU

50130 Toluca, Estado de México

Teléfono: +52 (722) 2965 550

jagarciaa@uaemex.mx

hsalinast@uaemex.mx

palomarez64@hotmail.com



Haga clic aquí para escribir al autor

Calidad del agua para riego en la Sierra Norte de Puebla, México

• Álvaro Can-Chulim* •

Universidad Autónoma de Nayarit, México

**Autor de correspondencia*

• Héctor Manuel Ortega-Escobar •

Colegio de Postgraduados, México

• Edgar Iván Sánchez-Bernal •

Universidad del Mar, México

• Elia Cruz-Crespo •

Universidad Autónoma de Nayarit, México

Resumen

Can-Chulim, A., Ortega-Escobar, H. M., Sánchez-Bernal, E. I., & Cruz-Crespo, E. (septiembre-octubre, 2014). Calidad del agua para riego en la Sierra Norte de Puebla, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(5), 77-96.

En el estado de Puebla, el agua es de gran importancia, ya que condiciona la posibilidad de incrementar el desarrollo económico. La mayor proporción de agua superficial se encuentra en la Sierra Norte, donde se emplea principalmente en la agricultura. A los cauces de los ríos se vierte agua de origen residual y de nacimientos termales, que modifican la calidad. Como el agua superficial de diferente origen y concentración se utiliza en la agricultura, se determinó su concentración y composición química, con el objetivo de evaluar su calidad para uso agrícola. Los principales parámetros de calidad y sus valores fueron: pH, media de 7.7, mínimo 6.1 y máximo 9.2; conductividad eléctrica, media de 346, mínimo 61.0 y máximo 1 913.0 $\mu\text{S cm}^{-1}$; relación de adsorción de sodio (RAS) con medias de $\text{RAS} = 1.0$, $\text{RASaj} = 1.4$ y $\text{RAS}^\circ = 1.0$; carbonato de sodio residual, con valores positivos en primavera y negativos en otoño; boro, media de 0.7, mínimo 0.0 y máximo 4.0 mg l^{-1} . El agua superficial de la Sierra Norte es apta para el riego, su concentración iónica es baja, debido a que proviene de los escurrimientos pluviales, teniendo variaciones mayores donde recibe agua de nacimientos termales y moderadamente donde recibe residuales. La hidrogeoquímica indica que el carácter químico dominante del agua es resultado de los procesos físico-químicos del agua con la geología regional. El agua es bicarbonatada, con variaciones en sodio y calcio. En temporada de estiaje, el sodio predomina, y en lluvias, el calcio.

Palabras clave: RAS ajustado, RAS corregido, agua bicarbonatada, precipitación, dilución.

Abstract

Can-Chulim, A., Ortega-Escobar, H. M., Sánchez-Bernal, E. I., & Cruz-Crespo, E. (September-October, 2014). Irrigation Water Quality in the Sierra Norte in Puebla, México. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(5), 77-96.

Water is crucial to the state of Puebla because of its importance to increasing economic development. Most of the surface water is found in the Sierra Norte, where it is primarily used for agriculture. Wastewater and water from thermal springs spill into the river channels, modifying the quality. Since different sources and concentrations of surface water are used in agriculture, its concentration and chemical compositions were determined in order to evaluate its quality for use in agriculture. The primary quality parameters and their values were: pH, mean of 7.7, minimum 6.1 and maximum 9.2; mean electric conductivity 346, minimum 61.0 and maximum 1913.0 $\mu\text{S cm}^{-1}$; sodium adsorption ratio (SAR) with SAR means $\text{RAS} = 1.0$, $\text{RASaj} = 1.4$ and $\text{RAS}^\circ = 1.0$; residual sodium carbonate, with positive values in the springtime and negative in autumn; and boron, mean of 0.7, minimum 0.0 and maximum 4.0 mg L^{-1} . Surface water in the Sierra Norte is suitable for irrigation. Its ionic concentration is low since it comes from runoff, with greater variations where it receives water from thermal springs and more moderate variations where it receives wastewater. The hydrogeochemistry indicates that the dominant chemical characteristics result from the physical and chemical processes of the water due to the regional geology. The water is bicarbonate, with variations in sodium and calcium. Sodium is predominant in the dry season and calcium predominates in the rainy season.

Keywords: Adjusted SAR, bicarbonate water, corrected SAR, dilution, precipitation.

Recibido: 07/11/12
Aceptado: 25/01/14

Introducción

El concepto de calidad del agua se refiere a la característica del agua que puede afectar su adaptabilidad a un uso específico y se define por sus características físicas, químicas o biológicas (Ayers & Westcot, 1987). Para uso agrícola, la calidad del agua se define por la concentración de iones específicos, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} y K^{+} como cationes; CO_3^{2-} , HCO_3^{-} , Cl^{-} y SO_4^{2-} como aniones, y otros de menor proporción como el B^{3+} y el P (Nishanthiny, Thushyanthy, Barathithasan, & Saravanan, 2010; Korzeniowska, 2008). Por otro lado, Silva (2004) cita que las características más importantes que determinan la calidad del agua para riego son la concentración total de sales solubles, la concentración relativa del sodio con respecto a otros cationes, la concentración de boro u otros elementos que puedan ser tóxicos y, bajo ciertas condiciones, la concentración de bicarbonatos en relación con la concentración de calcio más magnesio. En otras palabras, la calidad del agua para riego está determinada por la concentración y composición de los constituyentes disueltos que contenga.

La importancia de conocer la calidad del agua para riego tiene el fin de poder predecir su efecto sobre el suelo y los cultivos (Rashidi & Seilsepuor, 2011); para esto, es necesario determinar la concentración cualitativa y cuantitativa de los iones en solución, principalmente los iones que causan toxicidad y los que originan la formación de sales nocivas.

Los problemas más comunes causados por el agua de riego de mala calidad son la salinización paulatina de los suelos, que trae como consecuencia problemas osmóticos sobre las plantas, y la toxicidad de algunas sales y elementos iónicos. La parte osmótica puede ser explicada en términos de la concentración salina; a mayor concentración, menor potencial osmótico y, por tanto, menor disponibilidad del agua para las plantas (Casierri & Rodríguez, 2006; Baccaro et al., 2006). Con respecto a la toxicidad, una alta concentración de sales o iones causarán efectos tóxicos en las plantas; el

grado de toxicidad dependerá del tipo de sal o ion predominante y se refleja comúnmente en las hojas, que presentan cambios fisiológicos y morfológicos (Strogonov, 1964; Sánchez et al., 2002). El mecanismo de defensa de las plantas ante el estrés salino es el ajuste osmótico, que consiste en la acumulación de solutos en respuesta al déficit hídrico y la disminución del potencial hídrico total de hojas, tallos y raíces; como resultado, las plantas pueden absorber agua y mantener la actividad fisiológica; sin embargo, este ajuste osmótico lleva consigo un gasto de energía que se traduce, entre otros efectos, en una disminución del crecimiento vegetativo y de la productividad de las plantas (Silva, Ortiz, & Acevedo, 2007).

Los elementos contenidos en el agua y suelo son el resultado de procesos de intemperismo químico (hidrólisis, hidratación, solución, oxidación y carbonatación) de las rocas al contacto con el agua. Posteriormente ocurre la formación y acumulación de estos elementos en forma de sales en los suelos, como resultado de muchos procesos geoquímicos que suceden en las capas superficiales de la corteza terrestre (Grattan, 2006). En las rocas sedimentarias y suelos, capas del intemperismo, una gran parte de las sales se encuentra en forma cristalina y durante el humedecimiento una parte de ellas pasa a la fase líquida; a medida que aumenta la temperatura, la solubilidad de algunas sales se incrementa. La secuencia de la precipitación de las sales de una solución policomponente depende del grado de su solubilidad y las regularidades de la precipitación se han estudiado ampliamente en las aguas de altos contenidos salinos. En primer lugar, se precipitan los hidróxidos de silicio y fierro, después los carbonatos de calcio y magnesio, más adelante el yeso y los sulfatos de magnesio y, por último, los cloruros de sodio, potasio y magnesio (Szabolcs, 1989).

El proceso principal de la salinización de los suelos agrícolas es mediante la aplicación del agua de riego cuando no es manejada correctamente de acuerdo con su calidad. La mayoría de los tipos de agua de riego

consideradas peligrosas tienen un contenido relativo de sales que en sí mismo no es demasiado perjudicial; el problema se presenta cuando esa agua interacciona con la concentración salina del suelo (Rashidi & Seilsepuor, 2011). La evaporación y transpiración consumen grandes cantidades de agua que disminuyen la humedad del suelo, pero no afectan a las sales disueltas, de forma que la solución del suelo se hace más salina a medida que el suelo se seca. Por esta razón, un agua que inicialmente tuviera una concentración salina aceptable puede alcanzar valores elevados en el suelo. Pero, además, se presentan otros fenómenos al concentrarse las sales, por ejemplo, algunas de ellas puede alcanzar su límite de solubilidad y precipitar, retirando de la solución del suelo determinados cationes y alterando las proporciones iniciales (Miyamoto & Pingitore, 1992). Esto suele ocurrir con algunas sales de calcio de baja solubilidad (CaCO_3 y CaSO_4), lo que tiene como consecuencia un aumento en la proporción de sodio en la solución del suelo y del por ciento de sodio intercambiable (Silva, 2004).

En el estado de Puebla, el agua es de gran importancia, ya que condiciona fuertemente la posibilidad de incrementar el desarrollo económico. En la actualidad, la agricultura ocupa el 48.97% de la superficie total del estado y el 78% del agua es utilizada para esta actividad (Guevara-Romero, 2011; López-Téllez, 2011). La mayor proporción de aguas superficiales en la entidad se encuentra en la Sierra Norte, en donde es empleada principalmente en la agricultura, seguida de la industria, acuicultura y terapia. A los cauces de los ríos se vierte agua de origen residual, derivada de las industrias y de los distintos poblados que se encuentran en dicha zona. Al contar con agua superficial todo el año, los agricultores la usan para el riego de las principales especies agrícolas, utilizándola como fuente directa, es decir, sin un acondicionamiento previo. Con estos antecedentes, se plantea que los materiales geológicos de la zona y los vertidos de agua residual modifican la concentración cualitativa

y cuantitativa de los iones en solución, esto es, modifican la calidad del agua. Como el agua superficial de diferente origen y concentración se utiliza en la agricultura, en este estudio se determinó la composición química y las concentraciones totales electrolíticas, con el objetivo de evaluar su calidad para uso agrícola.

Metodología

Ubicación y caracterización del área de estudio

La Sierra Norte de Puebla se ubica geológicamente, en mayor proporción, en la Sierra Madre Oriental y una pequeña parte en el Eje Neovolcánico. Es una porción territorial de la provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental, subprovincia del Carso Huasteco, que atraviesa por el estado de Puebla; se localiza en la parte norte-centro del mismo, entre los 19° 39' latitud norte y 97° 15' longitud oeste.

Marco geológico

Esta región se identifica por su carácter netamente montañoso y comprende prácticamente a toda la región serrana del norte, la cual es un elemento de la Sierra Madre Oriental. Su relieve es relativamente moderno y sus ríos presentan numerosos saltos y cascadas. Su altitud varía entre 1 000 y 3 000 m. Las rocas que forman la Sierra Norte son principalmente calizas en gruesas capas, pizarras y calizas intercaladas de lutitas y areniscas, rocas casi todas del Mesozoico. En ella, las rocas sedimentarias, dispuestas en capas de espesor variable, ofrecen diferente resistencia a los procesos erosivos y a los esfuerzos corticales, y se manifiestan en grandes estructuras plegadas y dislocadas en ángulos bajos (Capra, Lugo-Hubp, & Zamorano-Orozco, 2006).

Las deformaciones orogénicas son las principales formadoras del relieve original sobre el que han actuado procesos erosivos controlados por sistemas de fallas y fracturas.

El agua, en su efecto disolutivo, ha contribuido a generar una morfología cárstica y ha labrado a la vez profundos cañones por los que drenan diversos ríos hacia el Golfo de México.

Hidrología

La región hidrológica Tuxpan-Nautla comprende la zona norte del estado de Puebla, representada por partes de las cuencas de los ríos Tecolutla, Cazones y Tuxpan, que desembocan en el Golfo de México. La hidrografía principal la conforma la vertiente norte, en donde el río Tecolutla es la corriente más característica de la Sierra Norte, y se forma por las siguientes corrientes: Necaxa, San Marcos, Tenango, Laxaxalpan, Tecuantepec o Zempoala, Joloapan, Apulco y Chichicatzipa. Con aguas de la parte alta de las tres primeras corrientes se construyó el importante sistema hidroeléctrico de Necaxa. En la porción norte-suroeste, entre los principales ríos están el Ajajalpa y el Marimba, y los lagos de Cruz Colorada, Cuatelolulco, Ajolotla y Chignahuapan (Galván *et al.*, 1999). Varios de estos ríos se originan de escurrimientos superficiales y manantiales de la zona.

Los ríos han labrado su cauce a través de los materiales volcánicos granulares no consolidados, depositados en los eventos volcánicos ocurridos posteriormente a la etapa de compresión que se produjo por movimientos tectónicos, y que provocaron el levantamiento y exposición de rocas marinas (Cuanalo & Melgarejo, 2002).

Los patrones de escurrimiento se determinan por la presencia de la Sierra Madre Oriental, en cuya vertiente oriente se originan los escurrimientos de los ríos que forman las grandes corrientes; estos pequeños arroyos son perennes debido a los altos índices de infiltración. También se tiene una serie de pequeños embalses que se usan para aprovechamiento agrícola, además de que los arroyos son utilizados de esta forma (Galván *et al.*, 1999).

Clima

La distribución climática en la Sierra Norte de Puebla se presenta en una serie de franjas orientadas noroeste-sureste, que generan un gradiente climático cálido y semicálido húmedo en las partes bajas y templado húmedo en las zonas de mayor altitud (Martínez, Evangelista, Basurto, Mendoza, & Cruz-Rivas, 2007). En las zonas de mayor altitud, la precipitación anual oscila entre los 3 000 mm (Murillo-Licea, López-Ramírez, Chávez-Hernández, Marañón-Pimentel, & Brie-Gowland, 2010).

Suelos y cultivos

De acuerdo con Vázquez-Martínez *et al.* (2009), el suelo predominante en la Sierra Norte es el andosol. En el recorrido de muestreo, en el mes de abril de 2010, se identificaron las principales especies vegetales cultivadas que existen en la Sierra Norte: cacahuete, café, calabaza, cilantro, durazno, frijol, haba, maíz, naranja, papa, pimienta, alfalfa, avena, cebada, tomate, trigo, manzana, pera y zarzamora.

Muestreo de agua y métodos analíticos

En concordancia con los objetivos de este estudio, se realizaron dos muestreos: uno en primavera y otro en otoño de 2011, con 22 estaciones de muestreo. Se tomaron muestras de agua a lo largo de todo el área (sureste-noroeste), a fin de contar con una mayor representatividad de las aguas superficiales que circulan en el área. Para seleccionar los sitios de muestreo, se consideraron los principales puntos que contribuyen a la modificación de la calidad del agua, como los nacimientos de agua de diferente origen y los que llevan vertidos de agua residual. La toma de muestras se realizó con base en la NMX-AA-034-SCFI-2001, con tres muestras por estación. En la figura 1 se presenta la ubicación de las diferentes estaciones de muestreo del agua y en el cuadro 1, los parámetros que se determinaron en cada muestra.



Determinación	Método	Referencia
pH	Potenciométrico	NMX-AA-008-SCFI-2000
Conductividad eléctrica	Conductimetría	NMX-AA-093-SCFI-2000
Residuo seco evaporado	Gravimetría	NMX-AA-034-SCFI-2001
Calcio y magnesio	Volumetría	Richards, 1990
Sodio y potasio	Flamometría	NOM-021-SEMARNAT-2000
Carbonatos y bicarbonatos	Volumetría	NOM-021-SEMARNAT-2000
Cloruros	Volumetría	NMX-AA-073-SCFI-2001
Sulfatos	Turbidimetría	NOM-021-SEMARNAT-2000
Boro	Colorimetría	NOM-021-SEMARNAT-2000
Ortofosfatos	Colorimetría	Rodier, 1990

se determinó su composición química y sus concentraciones totales electrolíticas. Como parámetro de especial importancia, en lo que se refiere a la evaluación de la calidad del agua

Tecnología y Cie

que se utiliza en el riego de cultivos agrícolas, se determinaron los valores de la relación de adsorción de sodio en sus diferentes conceptualizaciones, relación de adsorción de sodio (RAS), relación de adsorción de sodio ajustado (RASaj) y relación de adsorción de sodio corregido (RAS°), ya que este índice incide directamente en las propiedades físico-químicas de los suelos y, por consiguiente, sobre las plantas. Además, en las muestras de agua se determinó el contenido de boro y fósforo.

Concentración iónica

Las exigencias de calidad para el agua de riego, a fin de prevenir la salinización de los suelos, se basan en la concentración total de sales solubles; para fines de diagnóstico y clasificación, se puede expresar en términos de conductividad eléctrica y se dividen en cuatro clases: agua de salinidad baja (C1: < 250 $\mu\text{S cm}^{-1}$), agua de salinidad media (C2: 250 - 750 $\mu\text{S cm}^{-1}$), agua de salinidad alta (C3: 750 - 2 250 $\mu\text{S cm}^{-1}$) y agua de salinidad muy alta (C4: > 2 250 $\mu\text{S cm}^{-1}$) (Richards, 1990).

Contenido de sodio

En cuanto al contenido de sodio en el agua de riego, se clasifica utilizando la relación de adsorción de sodio (RAS) con respecto a la concentración iónica (CE), mediante el diagrama propuesto por Richards (1990); esta clasificación se basa principalmente en el efecto que tiene el ion sodio adsorbido sobre las condiciones físicas del suelo, es decir, se predice el efecto del sodio del agua de riego, que pasará a formar parte del suelo. Con base en el contenido de sodio (RAS), el agua para riego se clasifica en cuatro clases: agua baja en sodio (S1), agua media en sodio (S2), agua alta en sodio (S3) y agua muy alta en sodio (S4).

La estimación de la RAS bajo diferentes conceptualizaciones prevé las variaciones de las concentraciones de los iones de Ca^{2+} . Por lo tanto, si se considera que se cuenta con una

amplitud de valores máximos y mínimos de la RAS de las diferentes soluciones y aguas que atraviesan los espesores superficiales de los suelos, se podrán estimar los diferentes niveles de sodio intercambiable que adquirirán los suelos cuando se riegan con aguas de diferente RAS.

Los valores de la RAS se calculan mediante las siguientes ecuaciones: (1) RAS original propuesta por Gapón (citado por Richards, 1990); (2) en 1968, Bower, Ogata y Tucker establecieron una modificación a los valores originales o explícitos de la RAS del agua que se utiliza para riego. Estos nuevos valores del índice RAS se conocen como RAS ajustada (RASaj); (3) en 1981, Suárez recomienda un nuevo procedimiento para el cálculo de la relación de adsorción de sodio, la RAS corregida (RAS°), que conjuntamente con el valor de Ca° ofrece una mejor comprensión de las modificaciones del calcio en la solución del suelo:

$$\text{RAS} = \frac{C_{\text{Na}^+}}{\sqrt{\frac{C_{\text{Ca}^{2+}} + C_{\text{Mg}^{2+}}}{2}}} \quad (1)$$

$$\text{RAS}_{aj} = \frac{C_{\text{Na}^+}}{\sqrt{\frac{C_{\text{Ca}^{2+}} + C_{\text{Mg}^{2+}}}{2}}} [1 + (8.4 - \text{pHc})] \quad (2)$$

Para el cálculo de pHc se usa la ecuación de Langelier (1936): $\text{pHc} = (\text{pK}_2' - \text{pK}_c') + p(\text{Ca}) + p(\text{Alk})$:

$$\text{RAS}^\circ = \frac{C_{\text{Na}^+}}{\sqrt{\frac{C_{\text{Ca}^\circ} + C_{\text{Mg}^{2+}}}{2}}} \quad (3)$$

En las ecuaciones anteriores, Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} se refieren a las concentraciones de los cationes solubles expresados en $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$; pHc es el pH teórico que el agua alcanzaría en equilibrio con el CaCO_3 ; pK_2' es el logaritmo negativo de la segunda constante de disociación del ácido carbónico (H_2CO_3), corregido por la fuerza iónica; pK_c' es el producto de solubilidad

del CaCO_3 , corregido por la fuerza iónica; pCa corresponde al logaritmo negativo de la concentración molar de Ca ; p(Alk) corresponde al logaritmo negativo de la concentración equivalente de la base titulable de CO_3 y HCO_3^- ; Ca° es el contenido corregido de calcio en el agua de riego en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$; el valor de Ca° representa el contenido de calcio en el agua de riego, corregido por la salinidad del agua (CE), por el contenido de iones bicarbonato en relación con su propio contenido de calcio ($\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$) y por la presión parcial del dióxido de carbono (CO_2) ejercida en los primeros milímetros del suelo ($P = 0.0007 \text{ atm}$).

Carbonato de sodio residual

Otra de las consideraciones que Richards (1990) recomienda al evaluar la calidad es la concentración de bicarbonatos en relación con la concentración de calcio más magnesio. En el agua con altas concentraciones de iones bicarbonato existe la tendencia del calcio y del magnesio a precipitarse en forma de carbonatos, a medida que la solución del suelo se vuelve más concentrada. Eaton (1950) usa el término carbonato de sodio residual (CSR) al referirse a esta reacción. Este índice se calcula con la siguiente fórmula, donde todos los constituyentes iónicos se expresan en $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$:

$$\text{Carbonato de sodio residual} \\ (\text{CSR}) = (\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$$

Un agua con valor < 1.25 se clasifica como de buena calidad para uso agrícola, entre 1.25 y 2.5 como condicionada y > 2.5 como no recomendable (Nishanthiny et al., 2010). Cuando la diferencia es negativa no existe el problema y el valor de CSR puede suponerse igual a cero. Cuando el valor es positivo indica que Ca y Mg precipitan como carbonatos, existiendo sólo sales de sodio en la solución.

Boro

El boro es un micronutriente requerido por las plantas y el rango entre la deficiencia y

toxicidad es reducido (Goldberg, Corwin, Shouse, & Suarez, 2005). El contenido de boro en el agua de riego se expresa en mg l^{-1} y los valores de tolerancia se han establecido por Wilcox en 1948. Para cultivos sensibles, < 0.33 se clasifica como excelente, $0.33 - 0.67$ buena, $0.67 - 1.00$ aceptable, $1.00 - 1.25$ insegura, > 1.25 no recomendable; para cultivos semitolerantes, < 0.67 excelente, $0.67 - 1.33$ buena, $1.33 - 2.00$ aceptable, $2.00 - 2.50$ insegura, > 2.50 no recomendable; para cultivos tolerantes, < 1.00 excelente, $1.00 - 2.00$ buena, $2.00 - 3.00$ aceptable, $3.00 - 3.75$ insegura, > 3.75 no recomendable.

Fósforo

En las directrices para interpretar la calidad del agua para riego, Ayers y Westcot (1987) señalan que el contenido de fósforo normalmente aceptable es de 2.0 mg l^{-1} .

Clasificación hidrogeoquímica del agua

Los estudios hidroquímicos o hidrogeoquímicos sirven para determinar el origen de la composición química del agua y la relación entre el agua y la constitución química de las rocas. El método gráfico más utilizado para visualizar y clasificar los datos hidroquímicamente es el diagrama trilineal de Piper (Ray & Mukherjee, 2008).

Análisis estadístico (asociación de variables) y evaluación de datos analíticos

Para conocer la dependencia o asociación funcional entre las variables obtenidas en una muestra de una población determinada, la regresión lineal se convierte en la herramienta más adecuada (Méndez, Namihira-Guerrero, Moreno-Altamirano, & Sosa-De-Martínez, 1990). En esta investigación se calibró un modelo lineal sin ordenada o ajustada al origen mediante la técnica del análisis de regresión lineal. El ajuste del modelo se realizó al relacionar la concentración iónica de las soluciones en mg l^{-1} con la concentración en

términos de la conductividad eléctrica en $\mu\text{S cm}^{-1}$, con el método de mínimos cuadrados. El modelo tiene la estructura siguiente:

$$Y = fa X$$

Donde Y es la concentración de la solución en mg L^{-1} (sólidos disueltos totales); a , la pendiente de la recta, que significa el número de unidades en que aumenta Y por cada unidad de X ; X , la conductividad eléctrica de la solución en $\mu\text{S cm}^{-1}$.

Se verificó la exactitud de los valores analíticos mediante el método de comprobación recomendado por Eaton, Clesceri y Greenberg (1995), definido como sigue:

$$\% \text{ diferencia} = 100 \left[\frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} \right]$$

Resultados

Concentración iónica del agua

Los datos analíticos tienen un margen de error menor a 2%, valor aceptable para este tipo de agua de baja concentración (cuadros 2 y 3).

De acuerdo con los rangos de los valores de la conductividad eléctrica establecidos por Richards (1990), para considerar la calidad del agua de riego, el agua superficial de la Sierra Norte se clasifica como sigue: muestreo en primavera, 16 muestras de agua como C1, 3 muestras como C2 y 3 muestras como C3; muestreo en otoño, 14 muestras como C1, 5 muestras como C2 y 3 muestras como C3.

A su vez, se debe señalar que la relación funcional $\text{mg l}^{-1} = fa \text{ CE}$, en su proporcionalidad, la pendiente de la recta depende del tipo de salinidad. En la figura 2 se presenta la relación funcional entre las concentraciones de las sales solubles de las aguas superficiales de la Sierra Norte y sus valores correspondientes de la conductividad eléctrica. El valor de la pendiente a encontrada, para el muestreo en

primavera, fue de 0.7341 y para el otoño de 0.7062. El valor de a es arriba de 0.700, que corresponde a aguas con valores considerables en los contenidos de bicarbonatos.

Contenido de sodio

En el cuadro 4 se presenta la clasificación del agua superficial de la Sierra Norte de acuerdo con sus valores de RAS y en el cuadro 5 se presentan los valores de RAS en sus diferentes conceptualizaciones, en las cuales se toman en cuenta las variaciones en las concentraciones de los iones de calcio (Ca^{2+}) y de magnesio (Mg^{2+}) durante los procesos de precipitación o de disolución de la calcita. El agua superficial de la Sierra Norte se clasifica en general como S1, esto indica que no habrá problemas sobre las propiedades del suelo por efecto del sodio. El RASaj indica que dos estaciones se clasifican como S2, estos son el Nacimiento Termal Barranca Chignahuapan (núm. 16) en el muestreo de primavera y el Nacimiento Agua Mineral (núm. 14) en primavera y otoño.

Carbonato de sodio residual

De acuerdo con el cuadro 6, se puede observar que las estaciones de la Sierra Norte que se muestrearon en primavera tienen en sus concentraciones cantidades considerables de bicarbonatos, esto se deduce por tener valores de CSR positivos; una estación se clasifica como condicionada por tener un valor de 2.29 mmol l^{-1} y corresponde al río Agua Mineral en el Ejido Tuliman (núm. 15). En otoño, los valores obtenidos son negativos, indicando que son cálcico-magnésicas y magnésico-cálcicas; esto se deduce por los valores negativos (-) y se comprueba con los datos analíticos de estos elementos.

Boro

En el cuadro 6 se presentan los contenidos de boro en las estaciones de la Sierra Norte. La

Cuadro 2. Concentración iónica del agua superficial de la Sierra Norte de Puebla. Muestreo en primavera.

Estación	Fuente	pH	CE $\mu\text{S cm}^{-1}$	mmol L^{-1}			Suma cat	CO_3^{2-}	HCO_3^- mmol L^{-1}	Cl ⁻	SO_4^{2-}	Suma ani	Error %	STD mg L^{-1}
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺								
1	Nacimiento en Ejido Gómez Tepetenco	8.7	83	0.12	0.18	0.44	0.08	0.02	0.57	0.15	0.05	0.79	1.86	63.37
2	Río en Tlautitlaltepa	8.6	129	0.18	0.24	0.75	0.10	0.04	0.81	0.26	0.12	1.23	1.60	97.00
3	Río Texpilco en puente Zacapoaxtla	7.2	263	0.54	0.66	1.31	0.09	0.00	1.21	0.77	0.53	2.51	1.76	186.21
4	Río Apulco en Cascada La Gloria	7.5	157	0.37	0.39	0.73	0.06	0.00	0.63	0.51	0.35	1.49	1.97	108.27
5	Río Cuetzalan en Nauzonotla	7.6	241	0.61	0.55	1.18	0.03	0.00	1.24	0.42	0.67	2.33	0.85	175.03
6	Río Tepeacan en San Miguel	7.4	99	0.22	0.17	0.52	0.07	0.00	0.56	0.32	0.07	0.95	1.55	72.84
7	Río Escorial en Zapotitlán	7.8	78	0.16	0.19	0.37	0.05	0.00	0.47	0.20	0.09	0.76	0.65	58.31
8	Río Escorial en puente a Zacapoaxtla	8.1	186	0.48	0.50	0.67	0.16	0.00	1.21	0.40	0.18	1.79	0.56	137.35
9	Río San Pedro en Ahuacatlán	8.0	225	0.60	0.34	1.19	0.09	0.00	1.15	0.73	0.31	2.19	0.68	162.70
10	Río Ajajalpa en puente km 92	8.0	256	0.58	0.65	1.10	0.20	0.00	1.93	0.40	0.12	2.45	1.61	196.98
11	Nacimiento termal El Pinal en Jicolapan	7.3	897	2.40	2.60	3.57	0.29	0.00	5.61	2.60	0.39	8.60	1.49	651.30
12	Río Agrio en Cascada San Pedro	8.0	132	0.24	0.30	0.72	0.04	0.00	0.67	0.48	0.12	1.27	1.17	93.84
13	Cascada Quetzalapan en Ejido Tuliman	8.9	161	0.20	0.26	1.04	0.08	0.06	1.01	0.35	0.12	1.54	1.28	120.43
14	Nacimiento Agua Mineral en Ejido Tuliman	7.8	1332	2.50	3.05	7.18	0.42	0.00	7.84	4.62	0.35	12.81	1.31	964.65
15	Río Ajajalpa en Ejido Tuliman	8.1	672	1.80	1.90	2.75	0.19	0.00	3.97	2.10	0.40	6.47	1.30	484.29
16	Nacimiento termal Barranca Chignahuapan	7.5	1343	6.90	1.10	4.94	0.32	0.00	8.84	3.50	0.58	12.92	1.30	1007.70
17	Río Ajajalpa en Barranca Chignahuapan	8.8	169	0.18	0.23	1.21	0.05	0.04	1.13	0.32	0.14	1.63	1.21	129.36
18	Manantial en Chignahuapan	9.2	149	0.25	0.32	0.84	0.06	0.02	0.98	0.28	0.15	1.43	1.38	112.40
19	Nacimiento en entronque a Pueblo Nuevo	8.8	61	0.12	0.18	0.22	0.08	0.02	0.33	0.15	0.08	0.58	1.69	44.38
20	Jagüey en Pueblo Nuevo	6.7	107	0.20	0.32	0.37	0.17	0.00	0.65	0.25	0.12	1.02	1.92	80.42
21	Manantial en Puente Atotonilco	9.1	77	0.18	0.20	0.29	0.09	0.02	0.49	0.20	0.03	0.74	1.33	57.46
22	Río Agrio en Puente Atotonilco	8.3	156	0.38	0.45	0.62	0.09	0.00	1.05	0.38	0.07	1.50	1.32	116.21

Cuadro 3. Concentración iónica del agua superficial de la Sierra Norte de Puebla. Muestreo en otoño.

Estación	Altitud	pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K	Suma	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Suma	Error	STD
	m		μS cm ⁻¹	mmol _c L ⁻¹					cat	mmol _c L ⁻¹				ani	%
1	2 616	8.0	93	0.40	0.32	0.15	0.05	0.92	0.00	0.60	0.21	0.08	0.89	1.66	67.48
2	2 576	8.4	149	0.60	0.46	0.34	0.07	1.47	0.03	1.05	0.23	0.11	1.42	1.73	110.29
3	1 725	7.0	321	2.04	0.56	0.42	0.08	3.10	0.00	1.75	0.80	0.62	3.17	1.12	233.25
4	1 734	7.7	221	1.67	0.32	0.15	0.04	2.18	0.00	1.10	0.62	0.40	2.12	1.40	156.69
5	1 434	7.8	263	2.08	0.24	0.22	0.06	2.60	0.00	1.12	0.55	0.86	2.53	1.36	188.37
6	598	7.7	121	0.77	0.21	0.18	0.04	1.20	0.00	0.57	0.55	0.05	1.17	1.27	83.17
7	696	7.3	89	0.41	0.25	0.19	0.03	0.88	0.00	0.55	0.25	0.06	0.86	1.15	64.26
8	710	8.1	288	1.91	0.35	0.52	0.06	2.84	0.00	1.88	0.75	0.12	2.75	1.61	211.00
9	1 278	8.0	354	2.76	0.38	0.24	0.12	3.50	0.00	2.28	0.92	0.22	3.42	1.16	258.71
10	1 248	8.0	295	1.65	0.72	0.46	0.08	2.91	0.00	1.96	0.70	0.17	2.83	1.39	216.38
11	2 232	6.1	1261	7.70	3.25	1.15	0.35	12.45	0.00	6.53	3.92	1.68	12.13	1.30	881.73
12	2 048	7.2	134	0.51	0.41	0.32	0.08	1.32	0.00	0.66	0.44	0.18	1.28	1.54	92.45
13	2 166	6.9	245	0.57	1.02	0.68	0.15	2.42	0.00	1.52	0.61	0.23	2.36	1.26	176.69
14	1 905	6.4	1913	7.71	6.00	4.76	0.42	18.89	0.00	9.77	8.30	0.33	18.40	1.31	1309.74
15	1 905	7.0	243	0.93	0.75	0.61	0.11	2.40	0.00	1.30	0.85	0.19	2.34	1.27	170.40
16	2 170	7.0	1471	7.19	3.05	3.97	0.28	14.49	0.00	10.13	3.55	0.47	14.15	1.19	1091.74
17	2 170	6.7	108	0.35	0.40	0.26	0.06	1.07	0.00	0.60	0.30	0.14	1.04	1.42	77.13
18	2 273	6.6	238	0.94	0.87	0.46	0.08	2.35	0.00	1.25	0.75	0.29	2.29	1.29	166.28
19	2 572	6.7	119	0.58	0.30	0.23	0.04	1.15	0.00	0.65	0.37	0.16	1.18	1.29	85.88
20	2 613	6.4	104	0.41	0.25	0.29	0.08	1.03	0.00	0.63	0.28	0.08	0.99	1.98	76.18
21	2 224	8.7	90	0.39	0.27	0.15	0.08	0.89	0.04	0.51	0.27	0.05	0.87	1.14	64.44
22	2 224	7.3	116	0.37	0.36	0.32	0.10	1.15	0.00	0.58	0.38	0.16	1.12	1.32	82.78

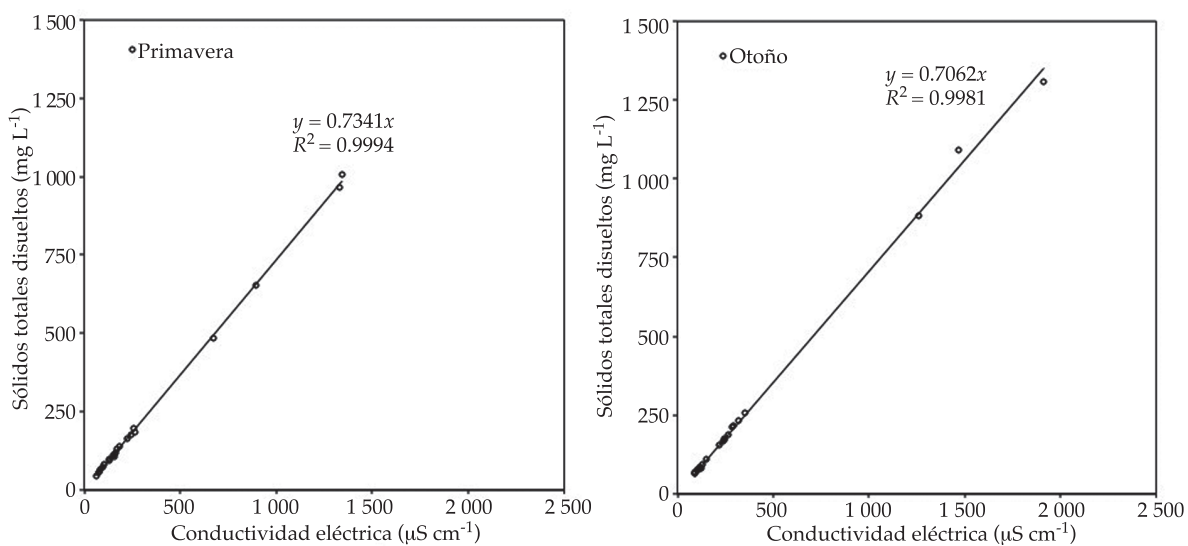


Figura 2. Concentración de sales y su relación con la conductividad eléctrica en el agua superficial de la Sierra Norte de Puebla. Muestreo en primavera y otoño.

Cuadro 4. Síntesis de la clasificación del agua superficial de la Sierra Norte de Puebla con base en los valores de sodio. Muestreo en primavera y otoño.

Muestreo	Formulaciones de RAS	Clasificación		Muestreo	Formulaciones de RAS	Clasificación	
		S1	S2			S1	S2
Primavera	RAS			Otoño	RAS		
	Muestras	22			Muestras	22	
	RAS _{aj}				RAS _{aj}		
	Muestras	20	2		Muestras	21	1
	RAS°				RAS°		
	Muestras	22			Muestras	22	

Cuadro 5. Valores de la relación de adsorción de sodio en el agua superficial de la Sierra Norte de Puebla. Muestreo en primavera y otoño.

Muestreo	Estación	pH	CE	RAS	RAS _{aj}	RAS°	Muestreo	Estación	pH	CE	RAS	RAS _{aj}	RAS°
			μS cm ⁻¹							μS cm ⁻¹			
Primavera	1	8.7	83	1.14	0.26	0.68	Otoño	1	8.0	93	0.25	0.15	0.16
	2	8.6	129	1.64	0.85	1.12		2	8.4	149	0.47	0.47	0.37
	3	7.2	263	1.69	1.85	1.40		3	7.0	321	0.37	0.58	0.35
	4	7.5	157	1.18	0.75	0.80		4	7.7	221	0.15	0.19	0.13
	5	7.6	241	1.55	1.69	1.28		5	7.8	263	0.20	0.27	0.17
	6	7.4	99	1.18	0.37	0.69		6	7.7	121	0.26	0.18	0.17
	7	7.8	78	0.88	0.17	0.51		7	7.3	89	0.33	0.18	0.20
	8	8.1	186	0.96	0.98	0.77		8	8.1	288	0.49	0.76	0.49
	9	8.0	225	1.74	1.69	1.37		9	8.0	354	0.19	0.34	0.21
	10	8.0	256	1.40	1.84	1.28		10	8.0	295	0.42	0.67	0.42
	11	7.3	897	2.26	5.17	2.59		11	6.1	1261	0.49	1.31	0.67
	12	8.0	132	1.39	0.72	0.95		12	7.2	134	0.47	0.35	0.32
	13	8.9	161	2.17	1.40	1.56		13	6.9	245	0.76	1.01	0.67
	14	7.8	1332	4.31	10.52	5.02		14	6.4	1913	1.82	5.25	2.39
	15	8.1	672	2.02	4.11	2.22		15	7.0	243	0.67	0.85	0.59
	16	7.5	1343	2.47	6.54	4.06		16	7.0	1471	1.75	4.92	2.66
	17	8.8	169	2.67	1.69	2.00		17	6.7	108	0.42	0.26	0.29
	18	9.2	149	1.57	1.12	1.16		18	6.6	238	0.48	0.62	0.41
	19	8.8	61	0.57	0.01	0.31		19	6.7	119	0.35	0.25	0.22
	20	6.7	107	0.73	0.36	0.50		20	6.4	104	0.50	0.30	0.32
	21	9.1	77	0.67	0.18	0.38		21	8.7	90	0.26	0.14	0.16
	22	8.3	156	0.96	0.86	0.76		22	7.3	116	0.53	0.32	0.34

mayoría de las estaciones contiene cantidades aceptables de boro. La fuente no recomendable para uso agrícola, con valor superior a 4 mg B l⁻¹, corresponde al Nacimiento Termal Barranca Chignahuapan (núm. 16); este nacimiento descarga al río Agua Mineral (núm. 15),

que es muestreado aguas abajo y tiene un contenido de 3.28 mg B l⁻¹. Otros dos puntos son nacimientos de agua: Nacimiento Agua Mineral (núm. 14) con concentración de 2.95 mg B l⁻¹ y Nacimiento Termal El Pinal (núm. 11), con 1.61 mg l⁻¹, ambos en otoño.

Cuadro 6. Evaluación del carbonato de sodio residual, boro y fósforo en el agua superficial de la Sierra Norte de Puebla. Muestreo en primavera y otoño.

Muestreo	Estación	CSR	Clasificación	B	Clasificación			P	Clasificación
		mmol L^{-1}		mg L^{-1}	Sensibles	Semitolerantes	Tolerantes	mg L^{-1}	
Primavera	1	0.29	Buena	0.43	Buena	Excelente	Excelente	0.02	Aceptable
	2	0.43	Buena	0.28	Excelente	Excelente	Excelente	0.02	Aceptable
	3	0.01	Buena	0.11	Excelente	Excelente	Excelente	0.13	Aceptable
	4	-0.13	Buena	0.10	Excelente	Excelente	Excelente	0.07	Aceptable
	5	0.08	Buena	0.07	Excelente	Excelente	Excelente	0.07	Aceptable
	6	0.17	Buena	0.11	Excelente	Excelente	Excelente	0.08	Aceptable
	7	0.12	Buena	0.14	Excelente	Excelente	Excelente	0.13	Aceptable
	8	0.23	Buena	0.13	Excelente	Excelente	Excelente	0.04	Aceptable
	9	0.21	Buena	0.04	Excelente	Excelente	Excelente	0.08	Aceptable
	10	0.70	Buena	0.15	Excelente	Excelente	Excelente	0.10	Aceptable
	11	0.61	Buena	1.54	No recomendable	Aceptable	Buena	0.05	Aceptable
	12	0.13	Buena	0.15	Excelente	Excelente	Excelente	0.24	Aceptable
	13	0.61	Buena	0.20	Excelente	Excelente	Excelente	0.21	Aceptable
	14	2.29	Condicionada	3.28	No recomendable	No recomendable	Insegura	0.06	Aceptable
	15	0.27	Buena	2.18	No recomendable	Insegura	Aceptable	0.04	Aceptable
	16	0.84	Buena	4.04	No recomendable	No recomendable	No recomendable	0.03	Aceptable
	17	0.76	Buena	0.01	Excelente	Excelente	Excelente	0.28	Aceptable
	18	0.43	Buena	0.06	Excelente	Excelente	Excelente	0.04	Aceptable
	19	0.05	Buena	0.15	Excelente	Excelente	Excelente	0.24	Aceptable
	20	0.13	Buena	0.12	Excelente	Excelente	Excelente	0.14	Aceptable
	21	0.13	Buena	0.00	Excelente	Excelente	Excelente	0.14	Aceptable
	22	0.22	Buena	0.42	Buena	Excelente	Excelente	0.09	Aceptable
Otoño	1	-0.12	Buena	0.23	Excelente	Excelente	Excelente	0.03	Aceptable
	2	0.02	Buena	0.18	Excelente	Excelente	Excelente	0.04	Aceptable
	3	-0.85	Buena	0.12	Excelente	Excelente	Excelente	0.14	Aceptable
	4	-0.89	Buena	0.10	Excelente	Excelente	Excelente	0.06	Aceptable
	5	-1.20	Buena	0.07	Excelente	Excelente	Excelente	0.05	Aceptable
	6	-0.41	Buena	0.11	Excelente	Excelente	Excelente	0.09	Aceptable
	7	-0.11	Buena	0.16	Excelente	Excelente	Excelente	0.21	Aceptable
	8	-0.38	Buena	0.13	Excelente	Excelente	Excelente	0.09	Aceptable
	9	-0.86	Buena	0.04	Excelente	Excelente	Excelente	0.08	Aceptable
	10	-0.41	Buena	0.18	Excelente	Excelente	Excelente	0.15	Aceptable
	11	-4.42	Buena	1.61	No recomendable	Aceptable	Buena	0.02	Aceptable
	12	-0.26	Buena	0.85	Aceptable	Buena	Excelente	0.36	Aceptable
	13	-0.07	Buena	0.64	Buena	Excelente	Excelente	0.69	Aceptable
	14	-3.94	Buena	2.95	No recomendable	No recomendable	Aceptable	0.08	Aceptable
	15	-0.38	Buena	0.75	Aceptable	Buena	Excelente	0.30	Aceptable
	16	-0.11	Buena	4.01	No recomendable	No recomendable	No recomendable	0.02	Aceptable
	17	-0.15	Buena	0.58	Buena	Excelente	Excelente	0.27	Aceptable
	18	-0.56	Buena	0.64	Buena	Excelente	Excelente	0.39	Aceptable
	19	-0.23	Buena	0.22	Excelente	Excelente	Excelente	0.25	Aceptable
	20	-0.03	Buena	0.68	Aceptable	Buena	Excelente	0.35	Aceptable
	21	-0.11	Buena	0.01	Excelente	Excelente	Excelente	0.10	Aceptable
	22	-0.15	Buena	0.85	Aceptable	Buena	Buena	0.30	Aceptable

Fósforo

El contenido de fósforo en el agua en los dos muestreos se encontró entre 0.02 y 0.69 mg l⁻¹; todas se consideran aptas para el riego (cuadro 6). En primavera se encontró una máxima de 0.28 mg l⁻¹, que corresponde al río Ajajalpa en Barranca Chignahuapan (núm. 17) y en otoño la máxima fue de 0.69 mg l⁻¹ en la Cascada Quetzalapa (núm. 13).

Clasificación hidrogeoquímica

Esta clasificación indica que el agua superficial muestreada en las diferentes estaciones de la Sierra Norte es en su mayoría bicarbonatada con variaciones en los cationes sodio y

calcio. En el primer muestreo se clasifica como sódica bicarbonatada (figura 3). En el segundo muestreo se clasifica como cálcica bicarbonatada (figura 4).

Discusión

Concentración iónica

El conocimiento de la amplitud numérica de los distintos parámetros conlleva a la identificación de la prevalencia de ciertos procesos en el agua superficial y en los suelos que se riegan con ésta. Para tener certeza de estos procesos, es necesario contar con datos analíticos confiables, para ello se evaluaron los datos, como lo recomiendan Eaton *et al.*

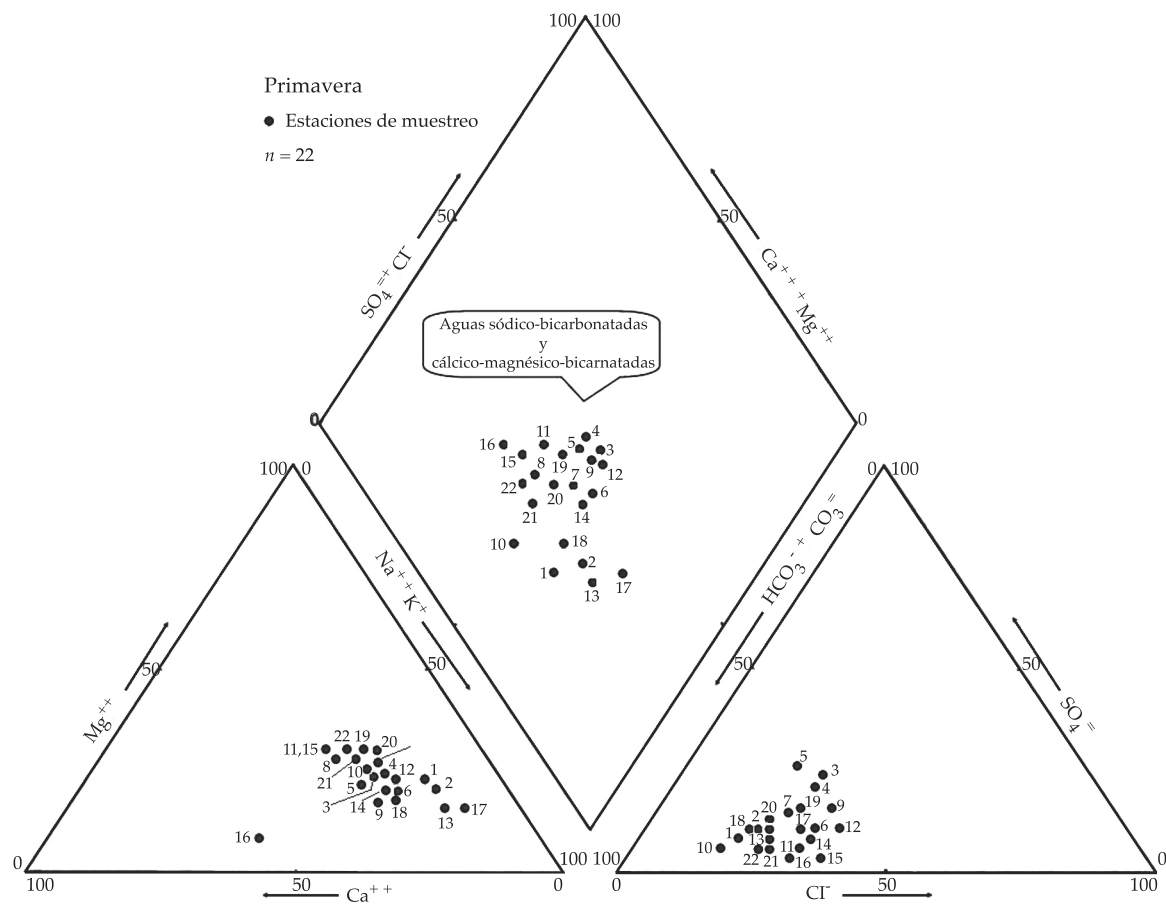


Figura 3. Clasificación hidrogeoquímica del agua superficial de la Sierra Norte de Puebla. Muestreo en primavera.

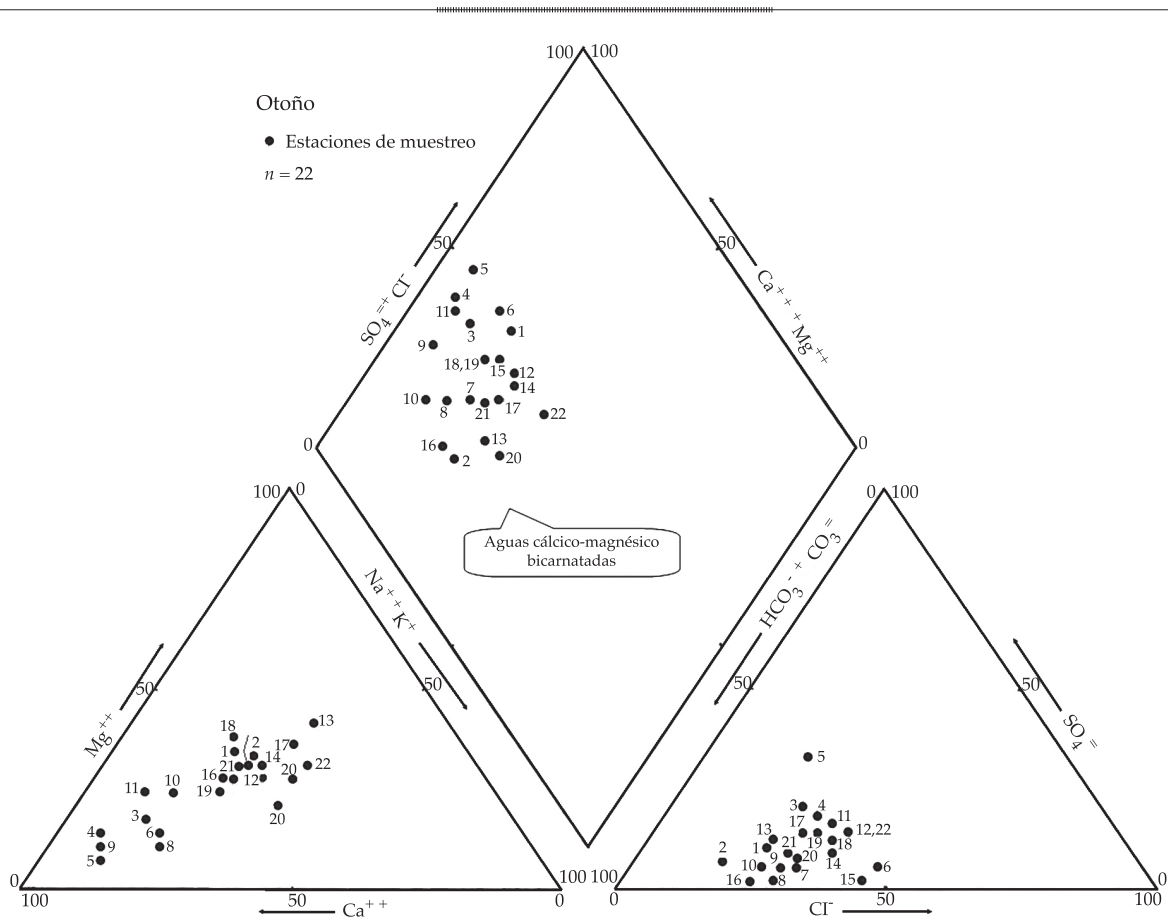


Figura 4. Clasificación hidrogeoquímica del agua superficial de la Sierra Norte de Puebla. Muestreo en otoño.

(1995). Esta recomendación se fundamenta en la electroneutralidad de las soluciones, es decir, la suma de aniones debe ser similar a la suma de cationes.

La media del pH fue 8.1, máximo de 9.2 y mínimo de 6.7 en primavera, y 7.3, 8.7 y 6.1, respectivamente, en otoño. Los valores normales de pH en el agua de riego de acuerdo con Ayers y Westcot (1987) oscilan entre 6.5-8.4. Los valores por arriba de 8.4 de acuerdo con Ortega *et al.* (2002) tendrán implicaciones importantes sobre la disponibilidad y el manejo de nutrientes.

En los trabajos de evaluación y caracterización del agua tanto superficial como subterránea se ha considerado que al medir la conductividad eléctrica en las soluciones acuosas se puede relacionar esta medición con los sólidos

disueltos en el agua (en mg l^{-1}). Velázquez, Ortega, Martínez, Kohashi, & García (2002), en su investigación, demostraron que el valor de la pendiente depende del tipo de sal dominante. Jurinak y Suarez (1990), y Richards (1990), en investigaciones específicas sobre numerosas determinaciones analíticas de la conductividad eléctrica y su relación con la cantidad en peso de los iones disociados, han establecido que las mediciones de conductividad eléctrica son directamente proporcionales a las masas moleculares disociadas. Aquí es necesario señalar que las mediciones de la conductividad eléctrica (CE) dependen del número de iones disociados en la solución, pero no de sus masas. La concentración en mg l^{-1} sí depende de ambos, es decir, depende del número de iones y de sus masas.

La calidad del agua, en función de la concentración total expresada como conductividad eléctrica, indica que se puede emplear el agua superficial de la Sierra Norte sin restricción para uso agrícola, exceptuando las fuentes que se clasifican como C3, que sólo se recomiendan para cultivos tolerantes a la salinidad. Las fuentes son las siguientes: nacimiento termal El Pinal (núm. 11), nacimiento Agua Mineral (núm. 14) y nacimiento termal Barranca Chignahuapan (núm. 16). El agua de las dos primeras, en caso de emplearse para el riego, se recomienda en cultivos como alfalfa, avena, cebada y trigo, que de acuerdo con Maas (1990) toleran estos niveles de salinidad y son aptas para las condiciones ambientales de la zona donde se ubican, que son los municipios de Chignahuapan y Zacatlán. La última se utiliza como para fines terapéuticos ($1343 \mu\text{S cm}^{-1}$), sin embargo se vierte al cauce del río Ajajalpa, que se muestrea aguas abajo en el Ejido Tuliman (núm. 15), con una concentración más diluida ($672 \mu\text{S cm}^{-1}$).

Las estaciones de muestreo que llevan agua de origen residual son el número 3 en Zacapuaxtla, el 10 en Zacatlán, y 13 y 14 en Chignahuapan. El agua residual proviene principalmente de estas poblaciones y son producto de la actividad industrial, en específico de la manufacturera, por lo que generalmente son colorantes que no alteran la concentración iónica.

Concentración de sodio

De acuerdo con Silva (2004) y Suarez, Wood y Lesch (2008), cuando se tienen altos valores de sodio intercambiable en los suelos, en estos últimos se presentan disminuciones en la permeabilidad, alteraciones en el medio poroso y efectos tóxicos en plantas sensibles al ion sodio. Existe una relación de proporcionalidad entre los valores de los parámetros RAS y por ciento de sodio intercambiable (PSI) en aguas de riego, ya que los valores de RAS se refieren a la cantidad de sodio adsorbido en el complejo de intercambio del suelo, como resultado de

la aplicación de un agua con un determinado contenido de sodio. Este parámetro se ha utilizado con muchas ventajas para hacer un excelente diagnóstico de los problemas de sodicidad en los suelos, en lugar de la determinación directa del sodio intercambiable. Los resultados en esta investigación demuestran que las tres expresiones de RAS permiten tener un rango de valores en cada punto, y con base en la característica del agua, en cuanto a pH, Ca, Mg y HCO_3^- , se puede predecir el efecto que tendrá el sodio sobre las propiedades de los suelos y, por consiguiente, sobre las plantas. La estación 14 tiene una RAS de 4.31, RASaj de 10.52 y RAS° 5.02. Los valores de Ca y Mg indican que se contrarresta el efecto del sodio, por esa razón se obtiene un valor bajo en la RAS original y RAS° . El valor de pH y el contenido de HCO_3^- permiten inferir que el Ca formará la sal CaCO_3 ; el valor de la RASaj demuestra esta tendencia, ya que considera la precipitación del Ca en presencia de HCO_3^- . Esta precipitación favorece la predominancia del sodio en el suelo, ya que al ser de baja solubilidad, permanece en el suelo después de que calcio y magnesio han precipitado, como lo citan Can-Chulim, Ramírez-Ayala, Ortega-Escobar, Trejo-López y Cruz-Díaz, en 2008.

Los resultados de la RAS indican que el agua superficial se puede usar en la agricultura sin restricción.

Carbonato de sodio residual

Cuando en el agua de riego el contenido de carbonatos y bicarbonatos es mayor que el contenido de calcio y magnesio, existe la posibilidad de que se forme el carbonato de sodio, debido a que por su alta solubilidad puede permanecer en solución aun después de que han precipitado los carbonatos de calcio y de magnesio.

Al realizar la evaluación del agua mediante este índice en los dos muestreos, sólo una fuente se clasifica como condicionada, la cual corresponde al nacimiento Agua Mineral (núm. 14), que no se utiliza para el riego, pero se vierte

directamente al río Ajajalpa. Los valores de CSR negativos indican que no existe problema para uso agrícola y los valores positivos muestran que Ca y Mg precipitarán como carbonatos cuando entren en contacto con el suelo, por lo que sólo permanecerán las sales de sodio en la solución del suelo. Dhembare (2012) encontró valores de CSR negativos y afirma que esto es porque el Ca y Mg no precipitan y permanecen en el agua. Se demuestra que en el periodo de estiaje se obtienen valores positivos de CSR, esto es porque los caudales se reducen y las concentraciones de Ca y Mg precipitan en forma de carbonatos. En el periodo de precipitación, estas sales precipitadas y, en general, las que se encuentran en los suelos y rocas de toda la zona de estudio se disuelven y son transportadas mediante los arroyos a los cauces principales. Nishanthiny *et al.* (2010) mencionan que la fuente principal de los contenidos de carbonatos son la disolución de las rocas carbonatadas. Por esta razón, los valores de CSR en la temporada de lluvias son negativos, porque los ríos contienen mayores concentraciones de Ca y Mg, producto de la disolución.

Boro

Comúnmente, los altos contenidos de boro se asocian con las áreas salinas que se encuentran en zonas áridas y semiáridas (Yermiyahu *et al.*, 2003). Pero también se encuentran en zonas de regadío, donde el boro proviene principalmente del agua subterránea, que adquiere ese contenido de la actividad volcánica o de los materiales parentales con la que tiene contacto (Gmélíng, Németh, Eby, & Varga, 2007; Özgür, 2001). Gmélíng *et al.* (2007) encontraron valores altos de boro en agua subterránea de campos volcánicos y las asociaron con la actividad geotérmica. Velázquez, Pimentel y Ortega (2011), en una cuenca exorreica de uso agrícola, encontraron valores altos de B en el agua subterránea y su origen son los flujos geotérmicos. En el agua superficial, el

contenido de boro proviene principalmente del vertido de agua proveniente de zonas con influencia volcánica, del contacto del agua con las rocas ricas en boro y, en menor proporción, del vertido de agua residual.

En zonas de mucha precipitación pluvial, los síntomas de deficiencia en las plantas son muy comunes, debido a que las concentraciones de boro en los suelos son muy bajas y también a la alta lixiviación; por el contrario, en las zonas áridas y semiáridas, los síntomas de toxicidad por boro son el resultado de las grandes concentraciones en la solución del suelo y de las provenientes del agua de riego (Korzeniowska, 2008; Onthong, Yoajui, & Kaewsichan, 2011). Tanto la deficiencia como la toxicidad inhiben el crecimiento de las plantas, que traen como consecuencia marcadas reducciones en el rendimiento de los cultivos y pérdidas económicas a los productores (Edelstein, 2007).

La fuente no recomendable para uso agrícola, con valor superior a 4 mg l⁻¹, corresponde al nacimiento termal Barranca Chignahuapan (núm. 16), que descarga al río Ajajalpa. En general, no existe problema para uso agrícola. Las fuentes de mayor concentración corresponden a nacimientos de agua, influenciados por la actividad volcánica residual de la caldera de Acoculco. La característica de estas fuentes es el hidrotermalismo y se usan para fines terapéuticos.

Para usar el agua directamente de la fuente se deben seleccionar cultivos tolerantes, como avena, maíz, calabaza, alfalfa y sorgo, que soportan entre 2.0 y 6.0 mg B l⁻¹ (Maas, 1990).

Fósforo

El fósforo es un nutriente esencial para las plantas (Mendoza, Rodríguez-Martín, Fernández-Vera, Palacios-Díaz, & Hernández-Moreno, 2003) y es absorbido por la planta en forma de ortofosfatos. Los ortofosfatos son las formas inorgánicas más comunes del fósforo y en el agua de poca circulación causan diferentes niveles de intensidad de desarrollo

en los procesos de eutrofización. En el agua se encuentran en bajas concentraciones, pudiendo aumentar debido a incorporaciones de agua de origen urbano industrial (Johnston & Dawson, 2005). En el agua de la Sierra Norte no existe problema con el contenido de fósforo, se puede usar para fines agrícolas y en las presas los procesos de eutrofización serán incipientes.

Clasificación hidrogeoquímica

Las estaciones de agua superficial con concentraciones altas son principalmente los nacimientos de agua, que se encuentran en un área geotérmica caracterizada por el hidrotermalismo. De acuerdo con Camprubí, González-Partida, Levresse, Tritlla y Carrillo-Chávez (2003), el hidrotermalismo se debe al contacto del agua con fuentes de calor provenientes de la actividad magmática que circulan por las fallas o zonas de fractura provocadas por actividad volcánica.

Existen tres nacimientos de agua con temperaturas superiores a los 30 °C. Una de ellas, el nacimiento termal Barranca Chignahuapan (núm. 16 con 48 °C), es explotado como baño termal por sus propiedades terapéuticas, como las de Viterbo, Italia (Piscopo *et al.*, 2006). Estos tres nacimientos con temperaturas elevadas se encuentran fuera de la caldera de Acoculco, pero la fuente de la elevada temperatura proviene de las profundidades del centro de la caldera y por la alta permeabilidad que subyace; estas fuentes de calor que calientan el agua y que posteriormente circulan por las fisuras o canales de disolución que se producen en las rocas calcáreas alimentan estos nacimientos. El tipo de agua sódica o cálcica bicarbonatada es una muestra de que el agua que alimenta estos puntos proviene del agua subterránea que subyace y circula por tales canales.

Desde el punto de vista hidrogeoquímico, las fuentes de agua superficial son en su mayoría bicarbonatadas, con variaciones en los cationes sodio y calcio. Estas variaciones se deben a la dilución y reconcentración. En periodos de estiaje, los iones menos solubles se

precipitan y sólo quedan en solución los más solubles. Esta es la razón del predominio del sodio en el primer muestreo, en donde las aguas se clasifican como sódicas bicarbonatadas. El segundo muestreo se realizó en época de intensa precipitación pluvial, donde las aguas interaccionan con los materiales calcáreos del área, diluyendo el calcio, y es lo que da el carácter de cálcicas bicarbonatadas.

Conclusiones

La Sierra Norte es un área donde las corrientes superficiales son la fuente de mayor importancia para la agricultura. La concentración iónica del agua superficial por lo general es baja, debido a que en su mayoría proviene de los escurrimientos pluviales, teniendo variaciones mayores en puntos donde recibe descargas de nacimientos de agua de origen termal, y moderadas en donde recibe agua de origen urbano industrial.

La calidad del agua superficial es alterada moderadamente por las aportaciones iónicas de agua de origen urbano industrial en algunos puntos del cauce de los ríos. En general, el agua superficial es apta para el riego. Las particularidades de agua no recomendable se relacionan con los puntos que corresponden a nacimientos de agua que no se usan directamente para el riego, pero que se vierten a los cauces. Estos puntos de elevada concentración iónica cualitativa y cuantitativa son puntuales, porque tales concentraciones cambian aguas abajo de las descargas, ya sea por la dilución o precipitación, o por procesos químicos como oxidación y reducción.

Desde el punto de vista hidrogeoquímico, el agua superficial es, en su mayoría, bicarbonatada con variaciones en los cationes sodio y calcio. Estas variaciones se deben a la dilución y a la precipitación del calcio. En temporada de lluvias, el calcio se diluye y en temporada de estiaje se precipita. El área geotermal de la caldera de Acoculco es la fuente de la elevada temperatura y concentración iónica de los nacimientos de agua circundantes.

Referencias

- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1987). *La calidad del agua y su uso en la agricultura* (81 pp.). Estudio FAO Riego y Drenaje 29, Rev. 1. Roma: FAO.
- Baccaro, K., Degorgue, M., Lucca, M., Picote, L., Zamuner, E., & Andreoli, Y. (2006). Calidad del agua para consumo humano y riego en muestras del Cinturón Hortícola de Mar del Plata. *RIA*, 35(3), 95-110.
- Bower, C. A., Ogata, G., & Tucker, J. M. (1968). Sodium Hazard of Irrigation Waters as Influenced by Leaching Fraction and by Precipitation or Solution of Calcium Carbonate. *Soil Science*, 106(1), 29-34.
- Camprubí, A., González-Partida, E., Levresse, G., Tritlla, J., & Carrillo-Chávez, A. (2003). Depósitos epitermales de alta y baja sulfuración: una tabla comparativa. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 56(1), 10-18.
- Can-Chulim, Á., Ramírez-Ayala, C., Ortega-Escobar, M., Trejo-López, C., & Cruz-Díaz, J. (2008). Evaluación de la relación de adsorción de sodio en las aguas del río Tulancingo, estado de Hidalgo, México. *Terra Latinoamericana*, 26(3), 243-252.
- Capra, L., Lugo-Hubp, J., & Zamorano-Orozco, J. J. (2006). La importancia de la geología en el estudio de los procesos de remoción en masa: el caso de Totomoxtla, Sierra Norte de Puebla, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(2), 205-214.
- Casierra, F., & Rodríguez, S. Y. (2006). Tolerancia de plantas de feijoa (*Acca sellowiana* [Berg] Burret) a la salinidad por NaCl. *Agronomía Colombiana*, 24(2), 258-265.
- Cuanalo, O. A., & Melgarejo, G. (2002). Inestabilidad de las laderas Sierras Norte y Nororiental del estado de Puebla. *Ciencia y Cultura*, 9(47), 51-55.
- Dhembare, A. J. (2012). Assessment of Water Quality Indices for Irrigation of Dynaneshwar Dam Water, Ahmednagar, Maharashtra, India. *Archives of Applied Science Research*, 4(1), 348-352.
- Eaton, A. D., Clesceri, L. S., & Greenberg, A. E. (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1325 pp). 19th Edition. Washington, DC: APHA, AWWA, WEF.
- Eaton, F. M. (1950). Significance of Carbonates in Irrigation Water. *Soil Science*, 69(2), 123-133.
- Edelstein, M. (2007). Grafted Melons Irrigated with Fresh or Effluent Water Tolerate Excess Boron. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 132(4), 484-491.
- Galván, A., Hernández, G., Vélez, H., Gómez, E., Becerril, A., & Luna, A. (1999). *Evaluación de impacto ambiental, informe final de actividades Sierra Norte de Puebla* (62 pp.). México, DF: Secretaría de Agricultura y Ganadería, Banco Mundial, Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa.
- Gmeling, K., Németh, K., Eby, U., & Varga, Z. (2007). Boron Concentrations of Volcanic Fields in Different Geotectonic Settings. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 159, 70-84.
- Goldberg, S., Corwin, D. L., Shouse, P. J., & Suarez, D. L. (2005). Prediction of Boron Adsorption by Field Samples of Diverse Textures. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69, 1379-1388.
- Grattan, S. (2006). Irrigation Water Composition and Salinization. In B. R. Hanson, S. R. Grattan, & A. Fulton (Eds.). *Agricultural Salinity and Drainage* (pp. 5-6). Water Management Series publication 3375. Davis, California: University of California Division of Agriculture and Natural Resources.
- Guevara-Romero, M. L. (2011). Tipos de vegetación de Puebla. En *La Biodiversidad en Puebla: Estudio de Estado* (pp. 75-83). México, DF: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), Gobierno del Estado de Puebla, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Johnston, A. E., & Dawson, C. J. (2005). *Phosphorus in Agriculture and in Relation to Water Quality* (71 pp.). Peterborough, United Kingdom: Agricultural Industries Confederation.
- Jurinak, J. J., & Suarez, D. L. (1990). The Chemistry of Salt Affected-Soils and Water. In K. K. Tanji (Ed.). *Agricultural Salinity Assessment and Management* (pp. 42-63). New York: ASCE.
- Korzeniowska, J. (2008). Response of Ten Winter wheat Cultivars to Boron Foliar Application in a Temperate Climate (South-West Poland). *Agronomy Research*, 6(2), 471-476.
- Langelier, W. F. (1936). The Analytical Control of Anticorrosion Water Treatment. *Journal American Waterworks Association*, 28, 1500-1521.
- López-Téllez, M. C. (2011). Usos del agua y situación de las cuencas hidrológicas. En *La Biodiversidad en Puebla: Estudio de Estado* (pp. 244-246). México, DF: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), Gobierno del Estado de Puebla, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Maas, E. V. (1990). Crop Salt Tolerance. En: K. K. Tanji (Ed.). *Agricultural Salinity Assessment and Management* (pp. 262-304). New York: ASCE.
- Martínez, M. Á., Evangelista, V., Basurto, F., Mendoza, M., & Cruz-Rivas, A. (2007). Flora útil de los cafetales en la Sierra Norte de Puebla, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 78, 15-40.
- Méndez-Ramírez, I., Namihira-Guerrero, D., Moreno-Altamirano, L., & Sosa-De-Martínez, C. (1990). *El protocolo de investigación. Lineamientos para su elaboración y análisis*. Segunda edición. México, DF: Trillas, 210 pp.
- Mendoza-Grimón, V., Rodríguez-Martín, R., Fernández-Vera, J. R., Palacios-Díaz, M. P., & Hernández-Moreno, J. M. (2003). Estudio de la disponibilidad del fósforo y boro aportados por las aguas depuradas en la Isla de Gran Canaria: Metodología y resultados preliminares.

- En J. Álvarez-Benedí & P. Marinero (Eds.). *Actas de las VI Jornadas sobre la Investigación de la Zona no Saturada del Suelo* (pp. 355-359). Vol. 6. Valladolid, España: Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León (ITA).
- Miyamoto, S., & Pingitore, N. E. (1992). Predicting Calcium and Magnesium Precipitation in Saline Solutions Following Evaporation. *Soil Science Society of America Journal*, 56(6), 1767-1775.
- Murillo-Licea, D., López-Ramírez, E., Chávez-Hernández, P., Marañón-Pimentel, B., & Brie-Gowland, N. (2010). *Gobernanza del agua en comunidades indígenas de la región nororiental de Puebla* (256 pp.). Colección Agua y Sociedad. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Nishanthiny, S. C., Thushyanthy, M., Barathithasan, T., & Saravanan, S. (2010). Irrigation Water Quality Based on Hydro Chemical Analysis, Jaffna, Sri Lanka. *American-Eurasian J. Agric. & Environ. Sci.*, 7(1), 100-102.
- NMX-AA-008-SCFI-2000 (2000). *Análisis de agua - determinación del Ph* (36 pp.). México, DF: Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.
- NMX-AA-034-SCFI-2001 (2001). *Análisis de agua - determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas* (18 pp.). México, DF: Secretaría de Economía.
- NMX-AA-073-SCFI-2001. *Análisis de agua - determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas* (18 pp.). México, DF: Secretaría de Economía.
- NMX-AA-093-SCFI-2000 (2000). *Análisis de agua - determinación de la conductividad electrolítica* (27 pp.). México, DF: Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.
- NOM-021-SEMARNAT-2000 (2000). *Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis* (85 pp.). México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Onthong, J., Yoajui, N., & Kaewsichan, L. (2011). Alleviation of Plant Boron Toxicity by Using Water to Leach Boron from Soil Contaminated by Wastewater from Rubber Wood Factories. *ScienceAsia*, 37, 314-319.
- Ortega, M. A., Castellanos, J. Z., Aguilar, R., Vázquez, A., Alaníz, E., Vargas, C., & Urrutia, F. (2002). A Conceptual Model for Increases of Sodium, SAR, Alkalinity and pH at the Independence Aquifer in Guanajuato. *Terra*, 20, 199-207.
- Özgür, N. (2001). Origin of High Boron Contents of the Thermal Waters of Kizildere and Vicinity, Western Anatolia, Turkey. *International Geology Review*, 43(10), 910-920.
- Piscopo, V., Barbieri, M., Monetti, V., Pagano, G., Pistoni, S., Ruggi, E., & Stanzioni, D. (2006). Hydrogeology of Thermal Waters in Viterbo Area, Central Italy. *Hydrogeology Journal*, 14, 1508-1521.
- Rashidi, M., & Seilsepour, M. (2011). Prediction of Soil Sodium Adsorption Ratio Based on Soil Electrical Conductivity. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 8(2), 379-383.
- Ray, R. K., & Mukherjee, R. (2008). Reproducing the Piper Trilinear Diagram in Rectangular Coordinates. *Methods Note. Ground Water*, 46(6), 893-896.
- Richards, L. A. (1990). *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos* (172 pp.). Manual núm. 60. Sexta reimpresión. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Laboratorio de Salinidad. México, DF: Limusa.
- Rodier, J. (1990). *Análisis de las aguas* (pp. 186-191). Segunda reimpresión. Barcelona: Omega.
- Sánchez, E., Ortega, M., Gonzáles, V., Ruelas, G., Kohashi, J., & García, N. (2002). Tolerancia de tubérculos de papa cv. Alpha en etapa de brotación a condiciones de salinidad. *Terra*, 21, 481-491.
- Silva, H., Ortiz, M., & Acevedo, E. (2007). Relaciones hídricas y ajuste osmótico en trigo. *Agrociencia*, 41(1), 23-34.
- Silva, E. I. L. (2004). Quality of Irrigation Water in Sri Lanka Status and Trends. *Asian Journal of Water*, 1(1-2), 5-12.
- Strogonov, B. P. (1964). *Physiological Basis of Salt Tolerance of Plants (As Affected by Various Types of Salinity)* (279 pp.). Jerusalem: Israel Program for Scientific Translation.
- Suarez, D. L. (1981). Relation between pH and Sodium Adsorption Ratio (SAR) and an Alternative Method of Estimating SAR of Soil or Drainage Waters. *Soil Science Society America Journal*, 45, 464-475.
- Suarez, D. L., Wood, J. D., & Lesch, S. M. (2008). Infiltration into Cropped Soils: Effect of Rain and Sodium Adsorption Ratio-Impacted Irrigation Water. *J. Environ. Qual.*, 37, 169-179.
- Szabolcs, I. (1989). *Salt Affected Soils* (274 pp.). Boca Raton, USA: CRS Press.
- Vázquez-Martínez, I., Vargas-López, S., Zaragoza-Ramírez, J. L., Bustamante-González, Á., Calderón-Sánchez, F., Rojas-Álvarez, J., & Casiano-Ventura, M. Á. (2009). Tipología de explotaciones ovinas en la Sierra Norte del estado de Puebla. *Técnica Pecuaria en México*, 47(4), 357-369.
- Velázquez, M. A., Ortega, M., Martínez, Á., Kohashi, J., & García, N. (2002). Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Terra*, 20, 459-464.
- Velázquez, M. A., Pimentel, J. L., & Ortega, M. (2011). Estudio de la distribución de boro en fuentes de agua de la cuenca del río Duero, México, utilizando análisis estadístico multivariado. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 27(1), 19-30.
- Wilcox, L. V. (1948). *The Quality of Water for Irrigation* (40 pp.). Tech. Bulletin 962. Washington, DC: Department of Agriculture.
- Yermiyahu, U., Finegold, I., Keren, R., Cohen, Y., Yehezkel, H., & Shmuel, D. (2003). Response of Pepper to Boron and Salinity under Greenhouse Conditions. *Acta Hort.*, 609, 149-154.

Dirección institucional de los autores

Dr. Álvaro Can Chulim

Unidad Académica de Agricultura
Universidad Autónoma de Nayarit
km 9 Carretera Tepic-Compostela
63780 Xalisco, Nayarit, México
Teléfono: +52 (311) 2110 128
canchulim@yahoo.com.mx

Dr. Héctor Manuel Ortega Escobar

Programa de Hidrociencias
Campus Montecillo
Colegio de Postgraduados
km 36.5 Carretera México-Texcoco
56230 Montecillo, Estado de México, México
Teléfono: +52 (959) 5201 200
manueloe@colpos.mx

Dr. Edgar Iván Sánchez Bernal

Instituto de Ecología
Universidad del Mar
Carretera a Zipolite km 1.5
San Pedro Pochutla, Oaxaca, México
Teléfono: +52 (958) 5843 149
edgarivansb@zicatela.umar.mx

Dra. Elia Cruz Crespo

Unidad Académica de Agricultura
Universidad Autónoma de Nayarit
km 9 Carretera Tepic-Compostela
63780 Xalisco, Nayarit, México
Teléfono: +52 (311) 2110 128
ccruzc2006@yahoo.com.mx



Haga clic aquí para escribir al autor

Contenido de boro en el agua superficial de Puebla, Tlaxcala y Veracruz

• Oscar Raúl Mancilla-Villa* •
Universidad de Guadalajara, México

*Autor de correspondencia

• Ana Laura Bautista-Olivas •
Universidad de Sonora, México

• Héctor Manuel Ortega-Escobar • Carlos Ramírez-Ayala •
Colegio de Postgraduados, México

• Amada Laura Reyes-Ortigoza •
Universidad Nacional Autónoma de México

• Héctor Flores-Magdaleno •
Colegio de Postgraduados, México

• Diego Raymundo González-Eguiarte • Rubén Darío Guevara-Gutiérrez •
Universidad de Guadalajara, México

Resumen

Mancilla-Villa, O. R., Bautista-Olivas, A. L., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., Reyes-Ortigoza, A. L., Flores-Magdaleno, H., González-Eguiarte, D. R. & Guevara-Gutiérrez, R. D. (septiembre-octubre, 2014). Contenido de boro en el agua superficial de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(5), 97-109.

El desarrollo de la actividad agrícola depende, entre otros factores, de la cantidad y calidad del agua disponible para riego. La calidad varía ampliamente de acuerdo con la cantidad y tipo de sales que contenga, ya que algunos elementos, como el boro (B), son tóxicos para las plantas. En Puebla, Tlaxcala y Veracruz son destinadas a la agricultura de riego más de un millón de hectáreas y por ello resulta imperante conocer la calidad del agua en cuanto al contenido del boro. En este estudio se llevó a cabo una investigación para conocer la conductividad eléctrica (CE), el pH y el contenido de B de estas muestras de agua, con tres recorridos y muestreos de agua en 2009, 2010 y 2011; se colectaron 91 muestras de agua por cada muestreo. La determinación de B se realizó por el método de la azometina-H, en el Laboratorio de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados. Las concentraciones de B en las muestras de agua fueron bajas, menores de 1 mg L⁻¹, en 76 de las 91 colectas de cada muestreo. En 15 muestras de agua se encontraron contenidos altos de B, mayores a 5 mg L⁻¹. De las muestras de agua analizadas, 83.5% se recomienda para uso agrícola sin ninguna restricción, mientras que 16.5% de los ríos y cuerpos de agua no es recomendable para usos agrícola, doméstico o de recreación debido a la peligrosidad y riesgos de toxicidad por B en cultivos y en humanos.

Palabras clave: agua superficial, límites permisibles de boro, toxicidad en cultivos, agua residual.

Abstract

Mancilla-Villa, O. R., Bautista-Olivas, A. L., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., Reyes-Ortigoza, A. L., Flores-Magdaleno, H., González-Eguiarte, D. R. & Guevara-Gutiérrez, R. D. (September-October, 2014). Content of Boron in Surface Water in Puebla, Tlaxcala, and Veracruz. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(5), 97-109.

The development of agriculture depends on the quantity and quality of water available for irrigation, among other factors. Quality varies widely according to the quantity and type of salts it contains, since some elements such as boron (B) are toxic for plants. In Puebla, Tlaxcala and Veracruz over one million hectares are used for irrigation agriculture, and therefore it is imperative to know the quality of water with respect to boron contents. Therefore, this study conducted an investigation to determine the electrical conductivity (EC), pH and B content in these waters based on three samplings, performed in 2009, 2010 and 2011. A total of 91 samples were taken for each sampling. B content in water was determined in the hydro-sciences laboratory of the Postgraduates College using the Azomethine-H method. Concentrations of B in the water were low and less than 1 mg L⁻¹ for 76 of the 91 samples collected for each sampling. High contents of B, above 5 mg L⁻¹, were found in 15 samples. Of the waters analyzed, 83.5% is recommended for agricultural use without restriction, while 16.5% is not recommended for agricultural, domestic or recreational uses due to the dangers and risk of toxicity from B in crops and in humans.

Keywords: Surface water, permissible limits of boron, toxicity in crops, sewage.

Recibido: 17/04/13
Aceptado: 25/01/14

Introducción

El boro (B) es un elemento esencial y potencialmente tóxico para las plantas cuando excede apenas ligeramente el nivel óptimo. Se encuentra en casi toda el agua natural y es uno de los constituyentes más tóxicos del agua de riego. Su concentración varía desde algunas trazas hasta varias partes por millón (Gupta, Jame, Cambell, Leyshon, & Nicholaichuk, 1985; Keren & Miyamoto, 1990; Singh & Singh, 1983; Verma, 1983; Elefteriou, 2001).

La toxicidad del B se presenta en concentraciones arriba de 1.25 mg l^{-1} para la mayoría de las plantas (Fox, 1968; Gupta, 1983; Gupta *et al.*, 1985; Munns & Tester, 2008; Ortega & Cintora, 2005; Richard, 1968; Ryan, Miyamoto, & Stroehlein, 1977; Singh & Randhawa, 1980; Verma, 1983; Brady & Weil, 2002). Las plantas pueden crecer normalmente en cultivos sobre arena con trazas de boro ($0.03\text{-}0.04 \text{ mg l}^{-1}$) y se presenta toxicidad cuando la concentración llega a 1 mg l^{-1} (Richard, 1968; Richards, 1973; Ayers & Westcot, 1989) y es suficiente para ocasionar sensibilidad en plantas de limón y naranjo, en tanto que la alfalfa logra desarrollo máximo si el agua de riego posee de $1 \text{ a } 2 \text{ mg l}^{-1}$ (Kelley, 1963; Brady & Weil, 2002).

El agua superficial natural rara vez contiene niveles tóxicos de B, pero el agua de manantiales y pozos puede contener concentraciones tóxicas, principalmente en la cercanía de fallas tectónicas y en zonas geotérmicas (Carrera *et al.*, 2011; Velázquez & Pimentel, 2006). La

clasificación del agua para uso agrícola con base en el contenido de B se presenta en el cuadro 1.

En humanos y animales, el B es un elemento nutricional benéfico, si no esencial, y es posible que su deficiencia pueda derivar en riesgos potenciales a la salud (Coughlin, 1998). Las frutas, vegetales y nueces son fuente de B en la dieta humana y una ingesta diaria aceptable es de 0.3 mg kg^{-1} de peso (Murray, 1998). Los límites máximos permitidos de B en el agua potable varían con las diversas normativas que existen al respecto.

Para México, la norma oficial de agua para uso y consumo humano (SSA, 1996) no incluye valores de referencia para el B y los criterios ecológicos de calidad del agua (Sedue, 1989) indican un máximo permisible de 1 mg l^{-1} ($1000 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$) para uso público urbano, valor que coincide con el indicado por la Directiva Europea (Weinthal, Parag, Vengosh, Muti, & Kloppmann, 2005). La Organización Mundial de la Salud lo sitúa en $500 \text{ } \mu\text{g l}^{-1}$ (WHO, 2008), aunque actualmente revisa este límite de concentración de B y provisionalmente lo marca en 2.6 mg l^{-1} (WHO, 2010). Los problemas sanitarios asociados con un consumo excesivo de B van desde daños al sistema digestivo (estómago, intestino), hígado, riñones y cerebro hasta la muerte (Selinus, 2004; WHO, 2008).

El B es un elemento ubicuo, que entra en las aguas superficiales y subterráneas a través de dos vías principales: intemperismo de rocas que contienen boro (borosilicatos del tipo turmalina

Cuadro 1. Clasificación de las aguas de riego con base en el contenido de boro.

Clase de agua	Grupo de cultivos		
	Sensibles	Semitolerantes	Tolerantes
	mg l^{-1}		
Excelente	< 0.33	< 0.67	< 1.00
Buena	$0.33 - 0.67$	$0.67 - 1.33$	$1.00 - 2.00$
Aceptable	$0.67 - 1.00$	$1.33 - 2.00$	$2.00 - 3.00$
Insegura	$1.0 - 1.25$	$2.00 - 2.50$	$3.00 - 3.75$
No recomendable	> 1.25	> 2.50	> 3.75

Fuente: Scofield, 1936; Wilcox, 1948.

y axinita) y aguas residuales, donde el B se deriva de productos de limpieza y residuos de industrias de pinturas y barnices, textiles, curtido de pieles y electrónica, entre otras (Dyer & Caprara, 2009; Velázquez, Pimentel, & Ortega, 2011). Las aguas residuales derivadas de diferentes sistemas pueden alcanzar las corrientes de agua superficial y subterránea, y provocar un problema de contaminación (Wolf, Held, Eiswirth, & Hötzel, 2004; Schmidt, 2007).

Una fuente adicional de B en el agua superficial es el agua de drenaje agrícola (Seiler, 2007), tal como se ha detectado en las zonas áridas del oeste de Estados Unidos (Lemly, Finger, & Nelson, 2009). En áreas de vulcanismo activo, donde el agua subterránea es influenciada por elevadas temperaturas ($\sim 200^\circ\text{C}$), el B se encuentra regularmente en concentraciones que pueden alcanzar los 150 mg l^{-1} (Morell, Pulido-Bosch, Daniele, & Cruz, 2008). La relación del B con áreas de vulcanismo es de relevancia en México, considerando que se han reconocido unas 2 332 manifestaciones geotérmicas, de las cuales aproximadamente 27 se localizan en los estados de Puebla y Veracruz (Iglesias, Arellano, & Torres, 2005).

En trabajos previos sobre calidad del agua en las cuencas de los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz, se ha encontrado que el B se adiciona a las aguas superficiales a través de las descargas de aguas residuales en la red hidrográfica, en tanto que el agua subterránea puede contener altas concentraciones de B de origen geotérmico (Velázquez & Pimentel, 2006; Can *et al.*, 2011). Estas concentraciones de B pueden representar un peligro potencial de toxicidad para los cultivos de la zona y problemas sanitarios en la población si tales fuentes se utilizan para consumo humano.

A pesar de su importancia ambiental, a la fecha se desconoce la distribución del B en las fuentes de aguas superficiales de Puebla, Tlaxcala y Veracruz; no se cuenta con datos sobre el aporte relativo de B a las aguas subterráneas y superficiales a partir de fuentes naturales y antropogénicas. A partir de estos antecedentes, en el presente trabajo se

planteó como objetivo analizar la distribución del B en las aguas superficiales de los estados mencionados y su potencial efecto tóxico en los cultivos y en la salud humana, esto último a través de los límites máximos permisibles establecidos por la normativa mexicana para distintos usos del agua.

Materiales y métodos

Lugar de estudio

El área de estudio se encuentra en el estado de Puebla y la parte centro-norte del estado de Veracruz, México (figura 1). El agua muestreada es utilizada para riego agrícola y uso doméstico; los ríos, manantiales y embalses muestreados en Puebla fueron Atoyac, Izúcar, Salado y Chiahutla. En Veracruz, Blanco, San Miguel, Chocamam, Coscomatepec, Pescados, Consolapa, Alseseca, Tlapacoyan, Filobobos, Nautla, Tecolutla, Cazones, Tuxpan, Tempoal, Pánuco, Tampico, Nogales, Ojo de Agua, Puente de Dios, El Carmen y Pancho Pozas. Las coordenadas geográficas del cuadrante del área de estudio son $22^\circ 00'$ latitud norte y $97^\circ 00'$ longitud oeste, hasta $18^\circ 00'$ latitud norte y $99^\circ 00'$ longitud oeste. Los sitios de muestreo se encuentran en altitudes desde 1 hasta 3 000 m.

La zona de estudio donde se realizó el recorrido de campo que se llevó a cabo para coleccionar las muestras de agua se inició en los límites de Puebla con Tlaxcala, y continuó por la parte sur de Puebla, posteriormente se recorrió la parte centro-norte de Veracruz y finalmente se terminó en la presa de Necaxa en Puebla. Para recolectar muestras de agua se llevaron a cabo tres muestreos en época de estiaje en la estación de otoño de 2009, 2010 y 2011. Las muestras de agua se colocaron en recipientes de polipropileno, con capacidad de 0.5 l, lavados previamente tres veces, dos con agua destilada y la tercera vez con agua desionizada. Se cuidó que el llenado de la botella fuera total, eliminando en lo posible las burbujas de aire introducidas con el agua, para reducir con ello las posibles reacciones

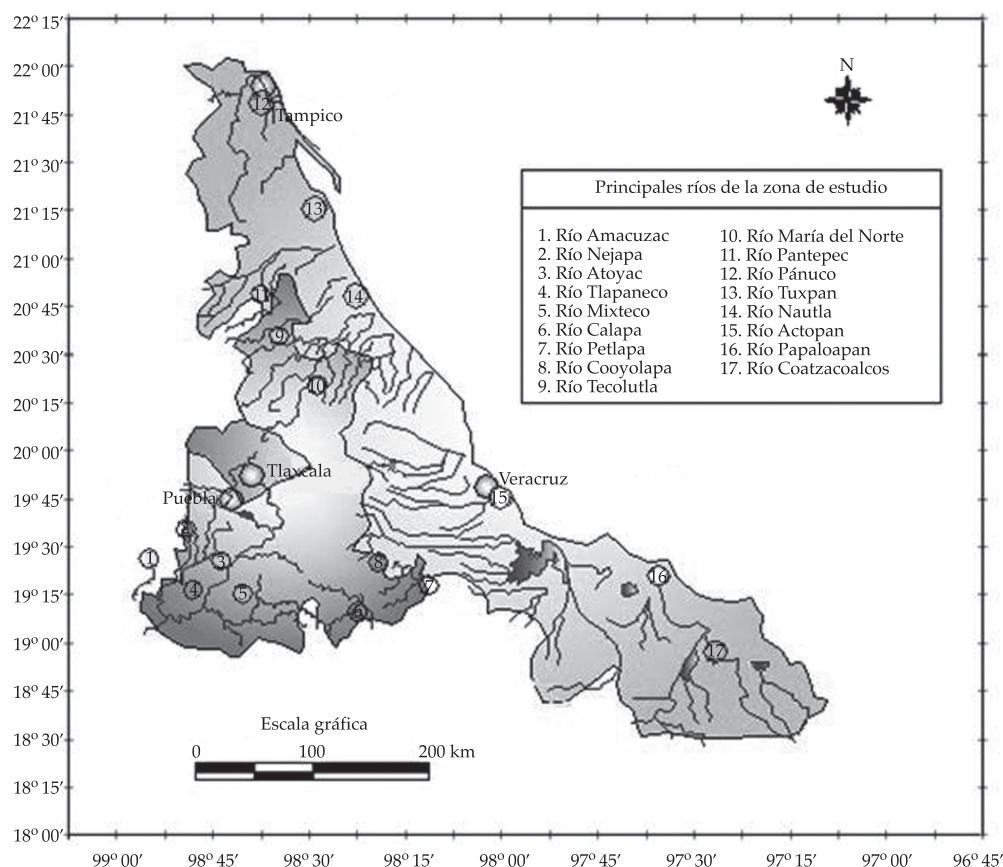


Figura 1. Localización del área de estudio.

del fluido con el oxígeno. Las estaciones de muestreo se ubicaron con un GPS Garmín MAP 60, mismo que se usó para establecer la altitud aproximada en metros de cada sitio.

Los parámetros químicos que se midieron fueron pH y CE al momento de tomar la muestra de acuerdo con APHA (1995). El contenido de B en las muestras de agua se determinó en el laboratorio de Ciencias Ambientales de Hidrociencias, en el Colegio de Postgraduados, Campus, Montecillo. El B fue analizado por el método de la azometina-H, el cual tiene un rango de detección de 0.5 a 10 $\mu\text{g ml}^{-1}$ (Bingham, 1982; Rodier, 1978; Rhoades, Ingvalson, & Hatcher, 1970). A los datos obtenidos se les realizó un análisis estadístico de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$) entre sitios de muestreo, para comprobar la existencia de

diferencias significativas del contenido de B en las aguas muestreadas.

Resultados y discusión

En el cuadro 2 se presenta la ubicación geográfica, altitud y nombres de las estaciones de muestreo consideradas en la presente investigación. Es importante mencionar que las estaciones se localizan en un rango de altitud que va desde el nivel del mar hasta los 3 000 m. Se consideraron los ríos y embalses importantes para el riego agrícola en los estados de Puebla y Veracruz. La información de los resultados se manejó en conjunto para las 91 estaciones de muestreo.

En la figura 2 se presenta el pH y la CE medidos en los ríos, manantiales y embalses

Cuadro 2. Ubicación geográfica y nombres de las estaciones de muestreo.

Núm.	Lugar	Posición geográfica		Altitud (m)	Núm.	Lugar	Posición geográfica		Altitud (m)
		L. norte	Long. oeste				L. norte	Long. oeste	
1	Bordo Tepozontitla, Puebla	19°30.556	98°31.98	2 933	47	Río Puente Pescados, Veracruz	19°21.821	96°49.574	486
2	La Presita Nanacamilpa, Puebla	19°28.848	98°31.115	2 887	48	Afluente a río Pescados	19°23.121	96°51.058	687
3	Río en Atotonilco, Puebla	19°21.665	98°27.517	2 492	49	Río Lomas, Veracruz	19°26.076	96°54.711	1 107
4	Río Atoyac, Puebla	19°19.374	98°27.678	2 502	50	Río Cosolapa, Veracruz	19°27.837	96°56.850	1 270
5	Río Atoyac, Puebla	19°18.918	98°27.729	2 452	51	Lago cráter Alchichica	19°24.579	97°23.791	2 500
6	Laguna Chiauhtla, Puebla	19°19.011	98°28.250	2 478	52	Lago cráter La Preciosa	19°22.471	97°23.008	2 510
7	Nacimiento Chiauhtla, Puebla	19°19.065	98°28.472	2 524	53	Lago cráter Quecholac	19°22.471	97°23.008	2 510
8	Nacimiento 2 Chiauhtla, Puebla	19°19.065	98°28.472	2 524	54	Nacimiento Manantiales, Puebla	19°16.307	97°21.343	2 512
9	Río Atoyac, Puebla	19°04.121	98°14.515	2 268	55	Nacimiento Bicencio	19°17.524	97°40.148	2 530
10	Presa Manuel Ávila Camacho, Puebla	18°54.645	98°06.502	2 220	56	Nacimiento El Carmen	19°19.026	97°37.945	2 532
11	Bordo San José Aguacate	18°51.634	98°11.152	2 099	57	Lago cráter Aljojuca	19°05.550	97°32.223	2 545
12	Río Huehuetlán, Puebla	18°45.700	98°10.553	1 485	58	Lago cráter San Miguel Tecuítlapa	19°07.408	97°32.680	2 551
13	Arroyo Huehuetlán, Puebla	18°43.910	98°11.648	1 445	59	Lago cráter Atexcac	19°20.211	97°26.979	2 529
14	Río en Izúcar	18°35.370	98°27.843	1 436	60	Arroyo en San José Capillas	19°13.544	97°22.705	2 635
15	Arroyo Epatlán, Puebla	18°38.559	98°22.408	1 437	61	Nacimiento Pancho Pozas Altotongo	19°44.375	97°15.145	2 646
16	Laguna Epatlán, Puebla	18°37.764	98°21.098	1 442	62	Río Pancho Pozas Altotongo	19°44.603	97°14.915	2 165
17	Arroyo El Rodeo, Puebla	18°35.757	98°15.407	1 384	63	Río Tlapacoyan, Veracruz	19°50.034	97°13.206	1 303
18	Río Atoyac en Coatzingo, Puebla	18°36.708	98°10.784	1 251	64	Río Alseseca, Puente Tomata, Veracruz	19°55.311	97°13.363	1 309
19	Río Aximilpa, Tepeji, Puebla	18°36.570	97°55.882	1 684	65	Cascada El Encanto Veracruz	19°58.865	97°10.435	601
20	Río Puente de Dios, Puebla	18°44.076	97°55.606	1 811	66	Arroyo de Piedra, Tlapacoyan, Veracruz	23°01.934	97°07.069	127
21	Río Tepeyahualco, Puebla	18°48.959	97°52.758	2 076	67	Río Filobobos, Veracruz	20°08.025	96°57.045	7
22	Riego Aspersión, La Purísima, Puebla	18°49.967	97°46.965	2 131	68	Río Nahuatla, Veracruz	20°12.770	96°46.718	18
23	Pozo San Antonio Tecolco, Puebla	18°51.575	97°46.234	2 150	69	Río en Nautla, Veracruz	20°12.891	96°45.686	5

24	Pozo Francisco Villa, Puebla	18°50.759	97°45.365	2 144	70	Río Nautla, Puente Remolino	20°23.949	97°14.247	24
25	Río Salado, Puebla	18°23.008	97°26.497	1 687	71	Arroyo afluente a río Tecolutla	20°23.160	97°18.362	48
26	Cascada Tilapa, Puebla	18°16.349	97°29.236	1 696	72	Río Tecolutla	20°26.939	97°05.005	58
27	Río Salado en Zapotitlán, Puebla	18°19.098	97°30.618	1 622	73	Río Cazones, Cazones, Veracruz	20°42.101	97°15.656	3
28	Arroyo en Salinas Zapotitlán, Puebla	18°20.809	97°26.930	1 642	74	Río Cazones, en La Unión, Veracruz	20°41.619	97°20.422	14
29	Pozo en Salinas Zapotitlán, Puebla	18°20.809	97°26.930	1 642	75	Arroyo en Países Bajos	20°54.140	97°21.946	6
30	Pileta en Salinas Puebla	18°20.809	97°26.930	1 642	76	Afluente a río Tuxpan	20°56.448	97°23.471	3
31	El Agua de Noé Alcutzingo, Puebla	18°44.927	97°14.518	1 649	77	Río Tuxpan, Puente Tuxpan	20°56.884	97°23.664	3
32	Río Blanco, Ojo Zarco Veracruz	18°46.843	97°12.379	1 435	78	Río en Tuxpan, Veracruz	20°58.416	97°18.473	2
33	Laguna Nogales, Veracruz	18°49.233	97°09.876	1 450	79	Río Afluente a Tuxpan	21°06.030	97°47.966	96
34	Río Blanco en Río Blanco, Veracruz	18°49.758	97°09.031	1 358	80	Arroyo Afluente a río Calabozos, Veracruz	21°03.900	98°08.644	103
35	Ojo de Agua, Orizaba, Veracruz	18°51.800	97°04.617	1 244	81	La Puerta, río Calabozos	21°03.835	98°09.230	92
36	Manantial en Matzinga, Veracruz	18°48.280	97°05.651	1 254	82	Río Terrero en Alagualtitla, Veracruz	20°56.629	98°10.681	98
37	Río en Matzinga Veracruz	18°48.280	97°05.651	1 254	83	Nacimiento Mezcatlán, Veracruz	20°58.663	98°09.203	447
38	Nacimiento Los Manantiales, Veracruz	18°47.836	97°06.351	1 265	84	Río en Platón Sánchez, Veracruz	21°17.920	98°21.403	61
39	Río Blanco, salida de Orizaba	18°49.964	97°05.266	1 256	85	Río Tempoal, Veracruz	21°30.037	98°24.699	36
40	Río San Miguel, Veracruz	18°53.582	97°00.700	938	86	Río Pánuco, Veracruz	22°03.629	98°10.566	2
41	Río Meltac, Veracruz	18°53.582	97°00.700	938	87	Puente Cortadura Laguna de Chila, Veracruz	22°10.990	98°01.125	1
42	Río Blanco, Córdoba, Veracruz	18°52.192	96°52.537	724	88	Río Pánuco, salida al mar	22°13.414	97°53.717	4
43	Manantial en río Atoyac	18°55.564	96°52.713	646	89	Río Cazones en Coronel Tito Hdez.	20°27.239	97°43.968	144
44	Río Chocaman, Veracruz	19°01.994	97°01.671	1 449	90	Presa Necaxa	20°13.196	97°59.966	1308
45	Río Coscomatepec, en Jamapa, Veracruz	19°06.004	97°02.037	1 458	91	Río en puente Texcapa II	20°13.196	97°59.966	1393
46	Río Huatuzco, Veracruz	19°09.072	96°49.574	486					

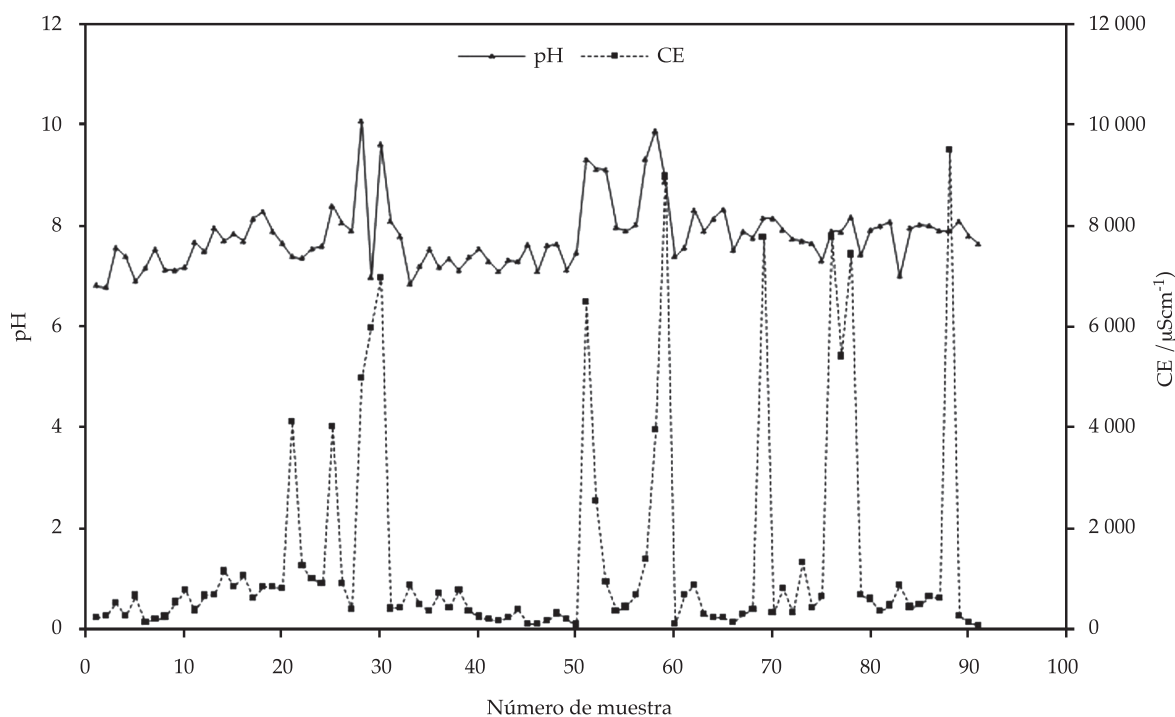


Figura 2. Conductividad eléctrica y pH medidos en las aguas muestreadas.

de Puebla y Veracruz. Los valores de estos parámetros fueron corregidos por los factores de temperatura respectivos. Se observa que 90% de las muestras presentó un pH entre 6.9 y 9 (el rango de límites máximos permisibles está entre 5 y 10 unidades para este parámetro), mientras que la conductividad eléctrica mostró en 85% de las muestras valores menores a 2 000 $\mu\text{S cm}^{-1}$, lo cual indica que el agua analizada, bajo el criterio de estos dos parámetros y desde el punto de vista agrícola, es recomendable de acuerdo con Ayers y Westcot (1989), con algunas restricciones para 15% de las muestras que presentó elevados valores de CE debido a que proceden de agua influenciada por agua marina y agua subterránea salina.

Contenido de boro

Can *et al.* (2011) realizaron una investigación acerca del contenido de boro en las aguas subterráneas de la Cuenca Oriental, México, que abarca parte de los estados de Tlaxcala,

Puebla y Veracruz. Encontraron que la mayoría de las aguas superficiales contiene cantidades aceptables de boro, pero las aguas de los pozos profundos en algunas áreas contienen cantidades tóxicas de boro debido al contacto que tienen con las rocas ígneas de la zona. Las principales rocas volcánicas son andesitas, basaltos y riolitas. Entre éstas predominan riolitas sódicas, fenocristales de olivino y sedimentos piroclásticos, que en su mayoría se definen como tobas.

Las aguas superficiales se ven sometidas, a su vez, a los efectos del vertido de las aguas residuales domésticas y los drenajes agrícolas a la red hidrográfica, siendo éstas las dos fuentes principales de sales en los ríos (Velázquez *et al.*, 2011). Una tercera fuente son los flujos geotérmicos (Velázquez & Pimentel, 2006), localizados en algunos sitios de la zona de estudio (Iglesias *et al.*, 2005).

El contenido de B en el agua superficial de Puebla, Tlaxcala y Veracruz, para los tres muestreos, fue de valores bajos, es decir,

menores a 1 mg l^{-1} (figura 3); sin embargo, algunas muestras de agua presentaron valores elevados por encima del límite máximo permisible para las plantas: 3.75 mg l^{-1} (Scofield, 1936; Wilcox, 1948).

El agua superficial de Tlaxcala, Puebla y Veracruz que presentó concentraciones de B bajas, menores a 1 mg l^{-1} , es el agua que está en contacto con rocas sedimentarias que cubren más de 75% de la superficie terrestre, como calizas, lutitas, diatomitas, limonitas, yesos y lateritas (Tarbuck & Lutgens, 2008).

El agua que presentó baja concentración de B se presenta en la figura 4, donde se observa que el contenido de este elemento en el agua no superó los 0.03 mg l^{-1} .

Las muestras de agua que se presentan en la figura 4 son recomendables para la agricultura de riego, para los cultivos tolerantes, como algodón, espárrago, sorgo, alfalfa, lechuga y maíz, entre otros (Van Der Leeden, Troise, & Todd, 1990), así como para los cultivos sensibles, como limón, aguacate, naranja y cebada (Can *et al.*, 2011). Es decir, esta agua, en

cuanto al contenido de B, se recomienda para su uso en la agricultura de riego de cualquier cultivo.

Las concentraciones altas, mayores de 5 mg l^{-1} , de B (Velázquez *et al.*, 2011) en las muestras de agua superficial se presentaron en 15 puntos de muestreo, que corresponden a río Salado, arroyo en Zapotitlán, lagos cráter Alchichica, La Preciosa, Quecholac, Aljojuca, Tecuitlapa, Atexcac y el río Atoyac, en Puebla. Las muestras analizadas de estos sitios mostraron una concentración de 9 hasta 45 mg l^{-1} de B; en Tlaxcala se presentó una concentración mayor de 12 mg l^{-1} en el manantial El Carmen; en Veracruz, los ríos Nautla y Tuxpan presentaron valores mayores de 12 y 24 mg l^{-1} de boro (figura 5).

Las muestras de agua que se observan en la figura 5 son las que presentaron un contenido de B alto, superior a los 5 mg l^{-1} . Los sitios de muestreo donde se colectaron estas alicuotas están cercanos a zonas montañosas del Eje Neovolcánico Transversal Mexicano, cuya composición geológica es principalmente de

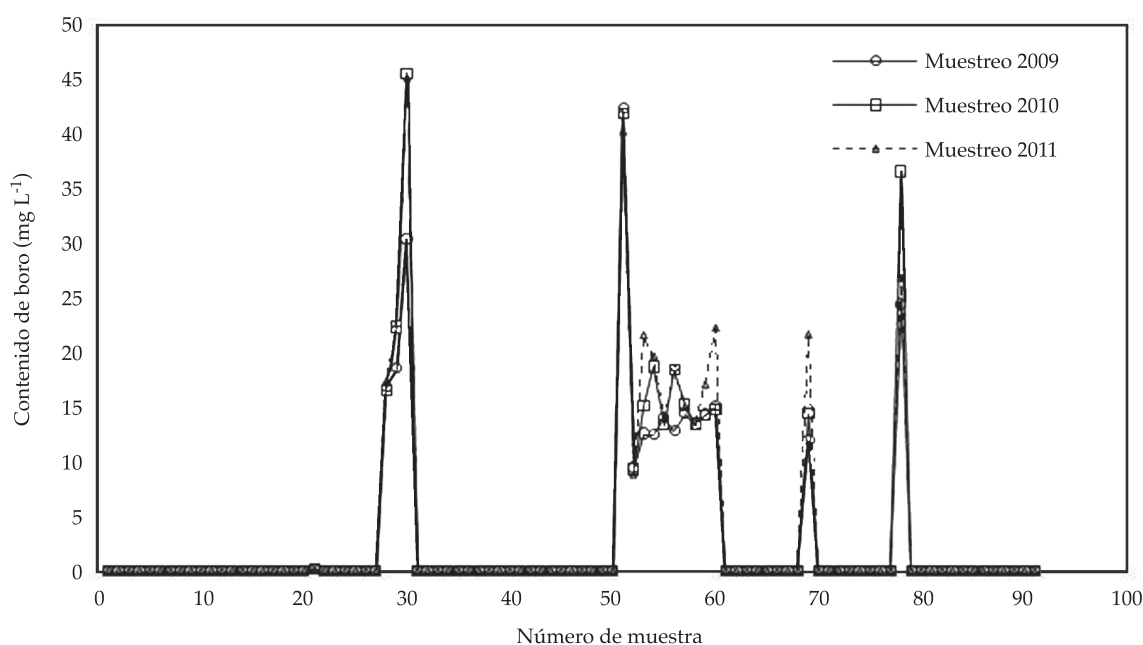


Figura 3. Concentración de boro en las aguas superficiales de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

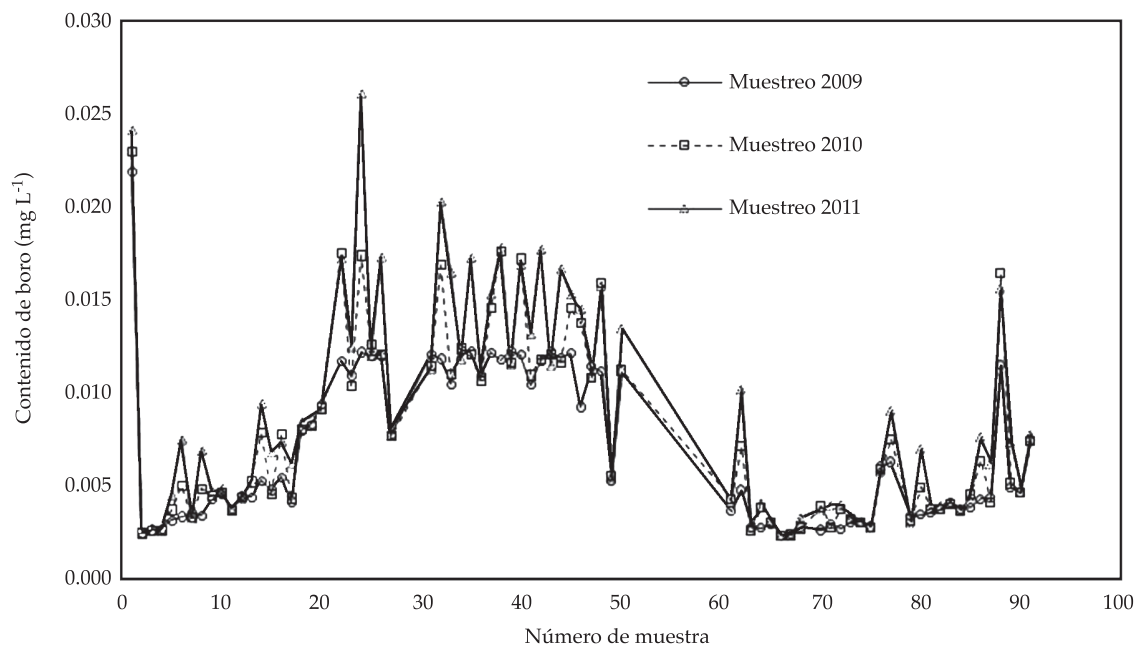


Figura 4. Concentraciones bajas de boro en las aguas superficiales de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

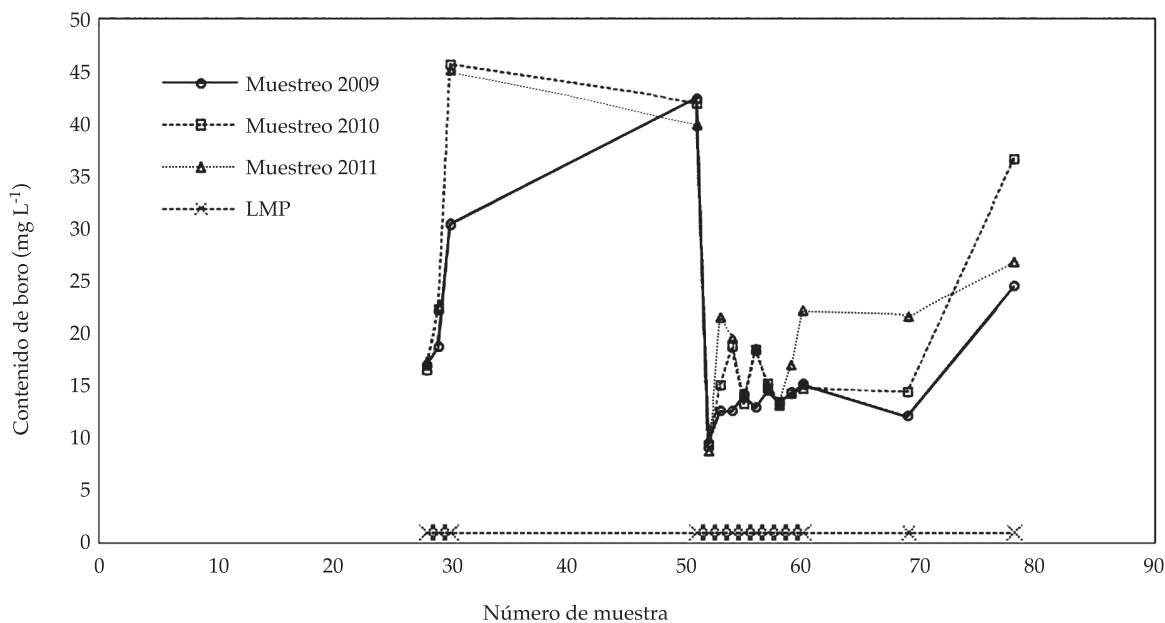


Figura 5. Concentraciones altas de boro en las aguas superficiales de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

rocas ígneas y, entre éstas, las que contienen B, como colemanita, bórax, olivino, sasolitas y pegmatitas, entre otras (Tarbuck & Lutgens,

2008); además, las muestras de agua de alto contenido de B de la zona de estudio pueden estar influenciadas por hidrotermalismo,

producto del vulcanismo reciente en la región (Alcocer, Escolero, & Marín, 2005).

Las muestras de agua con mayor contenido de B presentan además una mayor conductividad eléctrica, por consiguiente una mayor cantidad de sales disueltas, lo que puede ser influenciado por las sales de las intrusiones marinas (Salas, 1949; Reyes-Cortés, 1979). Es importante mencionar que el sinnúmero de manantiales salinos que se presenta en la región de Zapotitlán se debe a evaporitas marinas sepultadas y a sedimentos salinos carbonatados que tuvieron su origen durante las explosiones volcánicas que levantaron la zona de Zapotitlán durante el Terciario (Calderón-García, 1958; Salas, 1949; Villada, 1905; Reyes, 1998). Además, el tipo de salinidad del agua salina de Zapotitlán debe su origen al paso de aguas pluviales a través de las rocas calizas sedimentarias de esa zona (Cortés, 2009).

Por consiguiente, las colectas de agua de los 15 puntos de muestreo de alta concentración de B no son recomendables para riego agrícola, debido a que resultan tóxicas hasta para los cultivos más tolerantes. Además, su empleo es restringido para consumo humano (WHO, 2010), así como para uso doméstico y de recreación (Sedue, 1989).

Otro factor de las altas concentraciones de B puede ser los vertidos de agua residual agrícola, urbana e industrial que generan las actividades antropogénicas, sobre todo para los

casos de los ríos Nautla y Tuxpan en Veracruz.

En el cuadro 3 se presenta el análisis de medias Tukey en cuanto al contenido de B por sitio, en el agua superficial de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. De acuerdo con el análisis estadístico, se observa que existe diferencia significativa en el contenido de B entre el agua que presentó mayor CE de aquella de menor contenido de sales disueltas.

No existe diferencia significativa en el agua que se encuentran cerca de actividad volcánica reciente, como es el agua de los lagos cráter en la Cuenca Oriental (Can, 2011), o el agua de los ríos con presencia de contaminación importante con agua residual, como en los ríos Nautla y Tuxpan en Veracruz. El agua de menor contenido de B, alejada de zonas con influencia de hidrotermalismo y que reporta menor influencia por contaminación con aguas residuales no presenta diferencias significativas en cuanto al contenido de boro.

Conclusiones

La conductividad eléctrica de 90% de las muestras de agua superficial de Puebla, Tlaxcala y Veracruz presentó valores entre 100 y 200 $\mu\text{S cm}^{-1}$, valores óptimos para agua con uso agrícola.

El agua superficial analizada presentó valores de pH ligeramente alcalinos, lo que sugiere la presencia importante de carbonatos

Cuadro 3. Análisis estadístico con prueba de medias Tukey en cuanto al contenido de B por sitio para los tres muestreos en las aguas superficiales de Puebla, Tlaxcala y Veracruz.

Sitio	Rango de medias boro (mg l^{-1})	Tukey $\alpha = 0.05$ (¥)
30 y 51	40.42 a 41.59	A
78	29.34	B
29	21.2	C
28, 53, 54, 56, 60 y 69	16.058 a 17.424	CD
57 y 59	14.93 a 15.20	D
55 y 58	13.37 a 13.85	DE
52	9.2	E
1 al 27; 31 al 50; 61 al 68; 70 al 77; 79 al 91	0.002 a 0.138	F

¥ literal diferente significa diferencia significativa.

y bicarbonatos disueltos, pero no restringe el uso del agua en la agricultura.

El contenido de B en el agua superficial fue bajo en 76 de las muestras analizadas, por lo que esta agua es recomendable para riego agrícola sin ninguna restricción, así como para uso doméstico y de recreación.

Las 15 muestras de agua superficial de la zona de estudio que resultaron con alta concentración de B son influenciadas por hidrotermalismo, rocas que contienen B y presencia de sales por intrusiones marinas.

Las muestras de agua de alta concentración de B encontradas en 15 de los 91 sitios de muestreo en Puebla, Tlaxcala y Veracruz presentan restricción para usos agrícola, doméstico o de recreación debido a los riesgos de toxicidad tanto para los cultivos como para los humanos.

Existe diferencia significativa en cuanto al contenido de B entre sitios de muestreo y entre las muestras de agua de alta concentración iónica y las muestras de agua con baja concentración de sales disueltas y menor grado de contaminación con aguas residuales.

Referencias

- Alcocer, D. J., Escolero, F. Ó. A., & Marín, S. L. E. (2005). Problemática del agua de la Cuenca Oriental, estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala. En B. Jiménez & L. Marín (Eds.). *El agua en México vista desde la academia* (pp. 57-77). México, DF: Academia Mexicana de Ciencias.
- APHA (1995). *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (1035 pp.). Washington, DC: American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Pollution Control Federation (WPCF).
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1989). *La calidad del agua y su uso en la agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje 29 Rev. 1* (174 pp.). Trad. al español por J. F. Alfaro (Water Quality and Use in Agriculture). Roma: FAO.
- Bingham, F. T. (1982). Boron. In A. L. Page (Ed.). *Methods of Soil Analysis* (pp. 435-436). Part 2. Chemical and microbiological properties. Agronomy 9. Madison, USA: ASA, SSSA, WI.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2002). *The Nature and Properties of Soils* (960 pp.). (13 ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Calderón-García, A. (1958). *Bosquejo geológico de la región de San Juan Raya, Puebla* (pp. 9-27). XX Congreso Geológico Internacional, Libroto-Guía de la Excursión A-11, México, D.F.
- Can, C. A., Ortega, E. M., García, C. N., Reyes, O. A., González, H. V., & Flores, R. D. (2011). Origen y calidad del agua subterránea en la Cuenca Oriental de México. *Terra Latinoamericana*, 29(2), 189-200.
- Carrera-Villacres, D. V., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-García, J., Ramírez-Ayala, C., Trejo-López, C., & Becerril-Román, A. E. (2011). Boro, fosfatos e índices de salinidad del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac, México. *Tecnología y Ciencia del Agua*, 2(2), 5-21.
- Cortés, M. N. (2009). *Geoconservación y cultura: un análisis de paisaje en Zapotitlán Salinas-El Encinal, Puebla* (186 pp.). Tesis de maestría en Geografía. México, DF: UNAM.
- Coughlin, J. R. (1998). Inorganic Borates: Chemistry, Human Exposure, and Health and Regulatory Guidelines. *J. Trace Elem. Experim. Med.*, 9, 137-151.
- Eleftheriou, P. (2001). *Boron in Groundwater of the Island of Cyprus 2001* [en línea]. Citado el 26 de febrero de 2013. Recuperado de <http://www.hydroweb.com/jehabs/eleftabs>.
- Dyer, S. D., & Caprara, R. J. (2009). A Method for Evaluating Consumer Product Ingredient Contributions to Surface and Drinking Water: Boron as a Test Case. *Environ. Tox. Chem.*, 16, 2070-2081.
- Fox, R. H. (1968). The Effect of Calcium and pH on Boron Uptake from High Concentrations of Boron by Cotton and Alfalfa. *Soil Sci.*, 106(6), 435-439.
- Gupta, I. C. (1983). Concept of Residual Sodium Carbonate in Irrigation Waters in Relation to Sodic Hazard in Irrigated Soils. *Curr. Agric.*, 7(3,4), 97-113.
- Gupta, U. C., Jame, Y. W., Cambell, C. A., Leyshon, A. J., & Nicholaichuk, W. (1985). Boron Toxicity and Deficiency: A Review. *Can. J. Soil Sci.*, 65(3), 381-409.
- Iglesias, E., Arellano, V., & Torres, J. R. (2005). Estimación del recurso y prospectiva tecnológica de la geotermia en México [en línea]. Citado el 10 de febrero de 2013. Recuperado de http://www.sener.gob.mx/webSener/res/168/A3_Gtermia.pdf 12/06/2010.
- Kelley, W. P. (1963). Use of Saline Irrigation Water. *Soil Sci.*, 95, 385-391.
- Keren, R., & Miyamoto, S. (1990). Reclamation of Saline, Sodic and Boron Affected Soils. In K. K. Tanji (Ed.). *Agricultural Salinity Assessment and Management* (pp. 410-431). Chapter 19. ASCE. Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. New York: American Society of Civil Engineers.
- Lemly, A. D., Finger, S. E., & Nelson, M. K. (2009). Sources and Impacts of Irrigation Drainwater Contaminants in Arid Wetlands. *Environ. Tox. Chem.*, 12, 2265-2279.
- Morell, I., Pulido-Bosch, A., Daniele, L., & Cruz, J. V. (2008). Chemical and Isotopic Assessment in Volcanic Thermal Waters: Cases of Ischia (Italy) and São Miguel (Azores, Portugal) [en línea]. Citado el 5 de diciembre de 2012.

- Recuperado de <http://www3.interscience.wiley.com/journal/118720600/>.
- Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of Salinity Tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 59, 651-681.
- Murray, F. J. (1998). Issues in Boron Risk Assessment: Pivotal Study, Uncertainty Factors, and ADIs. *J. Trace Elem. Exp. Med.*, 9, 231-243.
- Ortega, Y. M., & Cintora, M. J. S. G. (2005). *Boro, fósforo, e índices de salinidad en las aguas residuales para riego agrícola en el valle del Mezquital, Hidalgo* (125 pp.). Tesis de Licenciatura en Biología. México, DF: UNAM.
- Reyes, G. J. C. (1998). *La sal en México II* (473 pp.). Colima, México: Universidad de Colima.
- Reyes-Cortés, M. (1979). *Geología de la Cuenca de Oriental, estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala* (62 pp.). Colección Científica, Prehistoria 71. México, DF: SEP-INAH.
- Rhoades, J. D., Ingvalson, R. D., & Hatcher, J. T. (1970). Laboratory Determination of Leachable Soil Boron. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34, 871-875.
- Richard, H. F. (1968). The Effect of Calcium and pH on Boron Uptake from High Concentrations of Boron by Cotton and Alfalfa. *Soil Sci.*, 106(6), 435-439.
- Richards, L. A. (Ed.). (1973). Suelos salinos y sódicos. Personal del Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de América. *FAO, Manual de Agricultura*, 60, 172.
- Rodier, J. (1978). *Análisis de las aguas* (pp. 186-191). Barcelona: Ediciones Omega.
- Ryan, J., Miyamoto, S., & Stroehlein, J. L. (1977). Relation of Solute and Sorbed Boron to the Boron Hazard in Irrigation Water Short Communication. *Plant and Soil.*, 47, 253-256.
- Salas, G. P. (1949). Bosquejo geológico de la cuenca sedimentaria de Oaxaca. *Bol. Asoc. Mexicana Geól. Petrol.*, 1(2), 79-156.
- Schmidt, K. D. (2007). Groundwater Quality in the Cortaro Area Northwest of Tucson, Arizona. *J. Am. Water Res. Assoc.*, 9, 598-606.
- Scofield, F. E. (1936). *The Salinity of Irrigation Water* (pp. 275-283). Washington, DC: Smith. Instit. Ann. Rep.
- Sedue (13 de diciembre de 1989). Norma CE-CCA-001/89. Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. *Diario Oficial de la Federación*, 430(9), 7-15.
- Seiler, R. L. (2007). Synthesis of Data from Studies by the National Irrigation Water-Quality Program. *J. Am. Water Res. Assoc.*, 32, 1233-1245.
- Selinus, O. (2004). Medical Geology: An Emerging Specialty. *Terrae*, 1(1), 8-15.
- Singh, J., & Randhawa, N. S. (1980). Boron Leaching and Regeneration Capacity in Saline Sodic Soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 28(3), 307-311.
- Singh, V., & Singh, S. P. (1983). Effect of Applied Boron on the Chemical Composition of Lentil Plants. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 31, 169-170.
- SSA (18 de enero de 1996). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. *Diario Oficial de la Federación*, 1-7.
- Tarbut, E. J., & Lutgens, F. J. (2008). *Ciencias de la Tierra* (721 pp.) (8a edición). Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Van Der Leeden, F., Troise, F. L., & Todd D. K. (1990). *The Water Encyclopedia* (808 pp.). Washington, DC: Island Press.
- Velázquez, M., & Pimentel, J. L. (del 24 al 26 de mayo, 2006). Salinidad, P, B y *E. coli* en el río Duero, Michoacán. *Memorias XV Congreso Nacional 2006 de la Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales* (CD-ROM), Guadalajara, Jalisco, México.
- Velázquez, M. A., Pimentel, J. L., & Ortega, H. M. (2011). Estudio de la distribución de boro en fuentes de agua de la cuenca del río Duero, México, utilizando análisis estadístico multivariado. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 27(1), 19-20.
- Verma, L. P. (1983). Tolerance of Wheat to Boron in Irrigation Water. *J. Indian Soc. Soil Sci.*, 31, 167-168.
- Villada, M. (1905). Una exploración a la cuenca fosilífera de San Juan Raya, Estado de Puebla. *Anales del Museo Nacional* (pp. 126-164). Tomo II. México.
- Weinthal, E., Parag, Y., Vengosh, A., Muti, A., & Kloppmann, W. (2005). The EU Drinking Water Directive: The Boron Standard and Scientific Uncertainty. *Europ. Environ.*, 15, 1-12.
- WHO (2008). *Guidelines for Drinking-Water Quality. Incorporating First and Second Addenda. Vol. 1. Recommendations.* (3a ed.) World Health Organization [en línea] Citado el 11 de enero de 2011. Recuperado de http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3rev/en/index.html 12/04/2010.
- WHO (2010). *Chemical Hazards in Drinking-Water-Boron.* World Health Organization 2010 [en línea]. Citado el 12 de abril de 2010. Recuperado de http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/boron/en/ 12/04/2010.
- Wilcox, L. V. (1948). The Quality of Water for Irrigation Use. US Department of Agriculture. *Tech. Bulletin*, 962, 40.
- Wolf, L., Held, I., Eiswirth, M., & Hötzl, H. (2004). Impact of Leaky Sewers on Groundwater Quality. *Act. Hydroch. Hydrol.*, 32, 361-373.

Dirección institucional de los autores

Dr. Oscar Raúl Mancilla-Villa

Universidad de Guadalajara
Centro Universitario de la Costa Sur
Departamento de Producción Agrícola
Avenida Independencia Nacional 151
48900 Autlán de Navarro, Jalisco, México
Teléfono: +52 (317) 3825 010, extensión 57026
oscar.mancilla@cucsur.udg.mx

Dra. Ana Laura Bautista-Olivas

Universidad de Sonora
Departamento de Agricultura y Ganadería
Carretera Bahía de Kino km 21
83000 Hermosillo, Sonora, MÉXICO
Teléfono: +52 (662) 5960 295
analaura@colpos.mx

Dr. Héctor Manuel Ortega-Escobar
Dr. Carlos Ramírez-Ayala
Dr. Héctor Flores-Magdaleno

Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo
Hidrociencias
Carretera México-Texcoco km 36.5
56230 Montecillo, Estado de México, MÉXICO
Teléfono: +52 (55) 5804 5900, extensión 1167
manueloe@colpos.mx

Dra. Amada Laura Reyes-Ortigoza

Departamento de Ecología y Recursos Naturales
Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Autónoma de México
Área de Biología
Colonia Universidad Nacional Autónoma
de México, CU, delegación Coyoacán
04510 México, D.F., MÉXICO
Teléfono: +52 (55) 5622 4827, extensión 24922
amadalaure@ciencias.unam.mx

Dr. Diego Raymundo González-Eguiarte

Profesor Investigador del Centro Universitario de Ciencias
Biológicas y Agropecuarias (CUCBA)
Universidad de Guadalajara
Camino Ramón Padilla Sánchez #2100
Nextipac Zapopan, Jalisco, MÉXICO
Teléfono: +52 (33) 3777 1150, extensión 3040 y 3190
diegonz@cucba.udg.mx

Dr. Rubén Darío Guevara Gutiérrez

Centro Universitario de la Costa Sur
Universidad de Guadalajara
Avenida Independencia Nacional núm. 151
48900, Autlán de Navarro, Jalisco, MÉXICO
Teléfono: +52 (317) 3825 010, extensión 57165
rguevara@cucsur.udg.mx



Haga clic aquí para escribir al autor



Situación actual de los humedales de Pátzcuaro, isla de Jarácuaro, Michoacán, México.

Foto: Lenin Medina Orozco.

Suelos de humedal del lago de Pátzcuaro, Michoacán, México

• Lenin E. Medina-Orozco* •

Universidad de la Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo, México

*Autor de correspondencia

• Norma E. García-Calderón • Felipe García-Oliva •

Universidad Nacional Autónoma de México

• Elena Ikkonen •

Academia Rusa de las Ciencias

Resumen

Medina-Orozco, L. E., García-Calderón, N. E., García-Oliva, F., & Ikkonen, E. (septiembre-octubre, 2014). Suelos de humedal del lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(5), 111-124.

En México, en particular en el estado de Michoacán, el estudio sobre la génesis, morfología y función de los suelos hidromórficos no ha sido explorado de forma suficiente, pese a contar con grandes extensiones de humedales continentales, como la zona vadosa del lago de Pátzcuaro. Se estudiaron dos humedales representativos de la costa del lago de Pátzcuaro, Michoacán: uno de ellos saturado permanentemente, con desarrollo de gleysoles, y un humedal con inundación periódica, fluvisoles, desarrollados en una gran planicie aluvial. Los resultados indican la presencia de un gleysol háplico (colúvico, éutrico) (WRB, 2006), de coloración pardo oscuro, con cantidades moderadas de carbono orgánico (0.87% promedio), arcilloso > 30%, de estructura predominante de poliedros subangulares y prismas con segregación de sesquióxidos ferromanganesos, sobresaliendo los hiporrevestimientos de óxidos de hierro, y presencia de restos de ostrácodos en la mayor parte del perfil. Destaca una discontinuidad litológica. Por su parte, en el humedal aluvial se presenta un fluvisol háplico (hiperhúmico, éutrico) (WRB, 2006), un suelo con matriz de color pardo grisáceo, con altos contenidos de materia orgánica en todo el perfil (> 7 %) y restos de ostrácodos. Son suelos con alta saturación de bases (> 50 %). Tres zonas de humedad son bien definidas al interior de los suelos: una zona baja de endosaturación permanente, una zona intermedia producto de la capilaridad, y una zona de secado-humedecimiento alternado en los epipedones.

Palabras clave: zona vadosa, suelos hídricos, rasgos hidromórficos, discontinuidad litológica.

Abstract

Medina-Orozco, L. E., García-Calderón, N. E., García-Oliva, F., & Ikkonen, E. (September-October, 2014). Wetland Soils from Lake Patzcuaro, Michoacan, Mexico. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(5), 111-124.

In Mexico and particularly in the state of Michoacan, the genesis, morphology and function of hydromorphic soils has not been sufficiently studied, despite having large areas of continental wetlands such as the vadose region of Lake Patzcuaro. We studied two wetlands representative of the shore of Lake Patzcuaro, Michoacan. One was permanently saturated with Gleysols development and the other was had periodic flooding and fluvisols development in a large floodplain. The results indicate the presence of haplic gleysol (colluvic, eutric) (WRB, 2006), dark brown in color, with moderate amounts of organic carbon (0.87 % average), clay > 30 %, predominant structure of subangular polyhedra and prisms with segregation of sesquioxides ferromanganese protruding from hypo-coatings of iron oxides, and the presence of traces of ostracods throughout most of the profile. Lithological discontinuity is prominent. The alluvial wetlands contain haplic fluvisol (hyperhumic, eutric) (WRB, 2006) with soil having a grayish brown matrix, a high content of organic matter throughout the profile (> 7 %), and traces of ostracods. These soils have a high base saturation (> 50 %). Three wet zones are well defined within the soil: a lower permanent endosaturation zone, an intermediate zone resulting from capillarity and an alternating wetting-drying zone in the epipedons.

Keywords: Hydric soils, hydromorphic features, lithological discontinuity, vadose region.

Recibido: 03/12/12

Aceptado: 12/02/14

Introducción

Los suelos hidromórficos presentan un nivel freático elevado o condiciones de saturación prolongada debido a procesos de inundación o estancamiento durante un periodo suficientemente largo como para desarrollar condiciones anaerobias en el suelo; estos suelos son reconocidos también como de humedal o hídricos (USDA-NRCS, 2006).

Los suelos temporalmente sumergidos y subacuáticos en México han sido escasamente estudiados, excepto para investigaciones muy puntuales. Por otro lado, en general, se acepta la relación directa entre inundación temporal de un suelo y expresión de rasgos redoximórficos; sin embargo, la anterior presunción no es del todo cierta, como ocurre en suelos donde el agua intersticial es rica en oxígeno disuelto o ésta se renueva de forma constante (Van Diepen, 1984; Driessen, Deckers, Spaargaren, & Nachtergaele, 2001).

Los estudios realizados en nuestro país sobre suelos hidromórficos pueden ser divididos en tres grupos: 1) suelos formados en cuencas altas de montaña no drenados; 2) con el mismo origen que los anteriores, pero drenados artificialmente, ambos con influencia completamente continental; y 3) suelos de lagunas costeras con influencia oceánica.

El primer grupo de estudios se ha realizado en suelos lacustres desarrollados en depresiones de cuencas de montaña de climas templados subhúmedos, típicos del centro del país. Entre ellos se encuentran los llamados “Chinampas” (antrososles térricos) en la Ciudad de México, con marcada discontinuidad en las propiedades físicas y químicas del perfil (Ramos, Cajuste, Flores, & García, 2001; Bello, García, Ortega, & Krasilnikov, 2011; Reyes-Ortigoza & García-Calderón, 2004). En relación con suelos de montaña en Michoacán, Ramos (2008) informa de gleysoles de reciente formación a partir de suelos arcillosos en la zona vadosa de la presa de Umécuaro.

El segundo grupo de suelos estudiados se formó en condiciones similares a los anteriores, en cuencas altas templadas, pero drenados de modo artificial, como los del ex lago de Texcoco, actualmente con cultivos en su mayor parte. Son suelos que se formaron por depósito en aguas tranquilas con desecación abrupta (Segura, Gutiérrez, Ortiz, David, & Gómez, 2000) y presentan pH de neutro a alcalino (6.9-10.6 salinos). En estos suelos se reportan rasgos micromorfológicos del carbonato de calcio formado en los diferentes ambientes evolutivos del lago con pérdida de rasgos redoximórficos (Gutiérrez, Stoops, & Ortiz, 1998; Ortiz et al., 2000; Segura et al., 2000).

El tercer grupo de suelos se desarrolló por influencia marina y vegetación de mangle, como los del estado de Tabasco. Se han reportado y descrito gleysoles y fluvisoles (Gutiérrez & Zavala, 2001; Rivera, Ferrera, Volker, Fernández, & Rodríguez, 2002). Además de histosoles con formación de materiales sulfhídricos (Moreno et al., 2002; Rivera et al., 2002). Por otro lado, Sedov et al. (2007) reportan suelos saturados de humedad en una toposecuencia del estado de Yucatán, clasificándolos como leptosol gléyico y calcisoles, con pH neutro (de 6.3 a 7.5); mientras Solleiro-Rebolledo et al. (2011) muestran la distribución de los suelos en humedales de Yucatán, reportando leptosoles, calcisoles, histosoles y fluvisoles.

Por otro lado, en el estado de Michoacán se encuentran tres de los lagos más importantes de México: Chapala, Cuitzeo y Pátzcuaro, donde se desarrollan suelos de humedal lacustre; sin embargo, en Pátzcuaro se cuenta con escasa información de suelos desarrollados en la zona vadosa. Por lo anterior, resulta relevante conocer la morfología y clasificar los suelos hidromórficos de la costa del lago.

El presente estudio tuvo como objetivo describir la morfología y los rasgos hidromórficos de los suelos en campo, y clasificarlos con base en los criterios del IUSS Grupo de Trabajo WRB 2007, en dos humedales del lago de Pátzcuaro, Michoacán.

Materiales y métodos

El lago de Pátzcuaro se localiza en el Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT), en donde se reportan más de mil conos volcánicos. Es una cuenca de tipo endorreica de origen tectovolcánico, dominada por derrames de lavas basálticas y andesíticas (Garduño-Monroy *et al.*, 2009). El primer humedal de estudio se ubica en la ribera de Ichupio, municipio de Tzintzuntzan, con coordenadas 19° 38' 22.6" N y 101° 35' 34.3" O, a una altitud de 2 040 msnm, restringido al pastoreo de ganado. El suelo se ha formado sobre un colapso de lavas basálticas del cerro El Metate (Garduño-Monroy *et al.*, 2009) en un piedemonte que ingresa al interior del lago, con una pendiente promedio de 5%. El segundo sitio se ubica en el humedal de Jarácuaro, municipio de Erongarícuaro, con coordenadas 19° 34' 00" N y 101° 41' 17.1" O, con altitud de 2 040 msnm (figura 1).

El suelo se ha formado sobre una secuencia de sedimentos y depósitos de ceniza volcánica del Cuaternario: Holoceno y Pleistoceno

sobre el graben de Pátzcuaro, que conforma una gran planicie aluvial (Israde-Alcántara, Garduño-Monroy, Fisher, Pollar, & Rodríguez-Pascua, 2005; Garduño-Monroy *et al.*, 2009) con pendiente promedio < 2%. El sitio es utilizado como potrero para ganadería extensiva. Las principales fuentes de alimento del hato son pastos hidrófitos y vegetación hidrófita enraizada emergente (figura 2).

Régimen climático de la zona lacustre

El clima zonal de acuerdo con las modificaciones de García (1988) es templado subhúmedo con lluvias en verano, distribuidas de junio a septiembre, con una precipitación total anual de 880 mm, temperatura media anual de 16.8 °C; el mes más cálido es junio; la clave climática es C (w²)(w)b(e)g (cuadro 1).

Descripción y colecta de muestras de suelos

En cada humedal se realizaron cinco perfiles en la zona vadosa para representar la diversidad

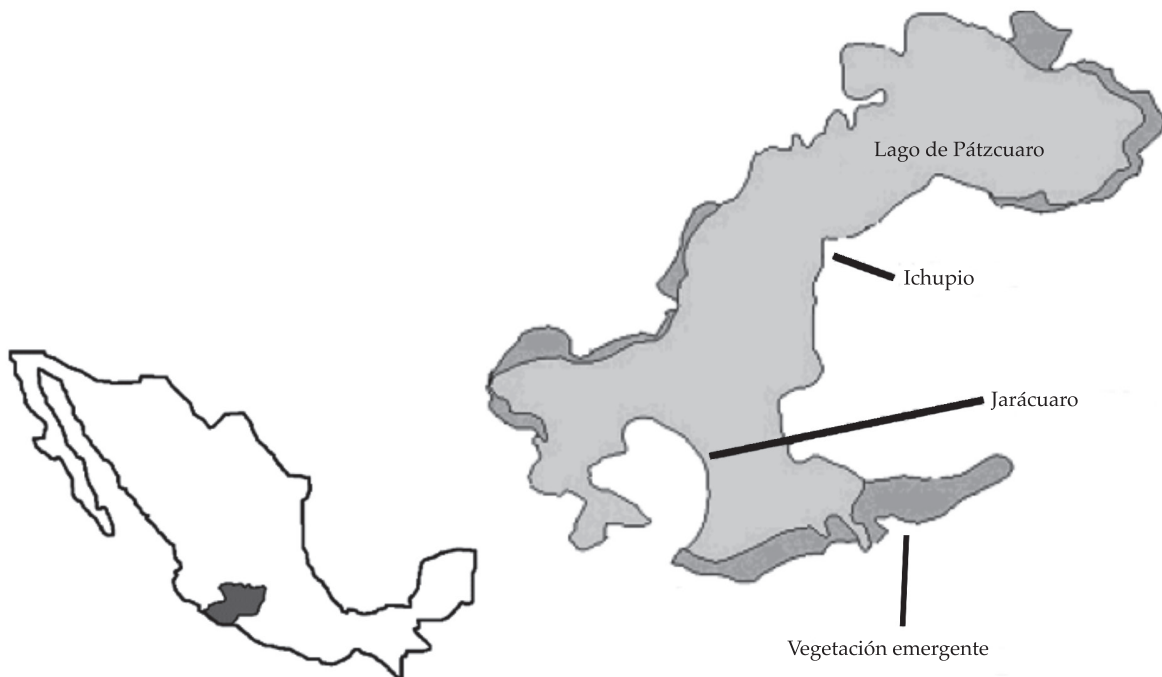


Figura 1. Localización de los humedales estudiados, Ichupio (gleysol) y Jarácuaro (fluvisol).



Figura 2. Sitios de estudio: Ichupio (izquierda) y Jarácuaro (derecha).

Cuadro 1. Balance hídrico para 29 años de registros de la estación climatológica de Pátzcuaro.

Variable	Meses												Total anual*
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	
Precipitación (mm)	37.1	13.8	6.4	8.4	37.1	145.1	206.0	196.4	166.5	72.7	19.4	11.1	919
ETP (mm)	26.3	35.3	46.4	58.7	67.0	68.1	58.5	57.8	55.7	49.6	38.8	30.7	593
Balance hídrico (mm)	-28.2	-49.7	-61.6	-90.4	-82.2	47.1	224.4	285.9	249.3	133.9	3.8	-39	
T media aire (°C)	13.0	14.3	16.4	18.4	19.6	19.7	18.3	18.2	17.9	16.9	15.0	13.3	16.8
T máxima aire (°C)	22.6	24.4	27.1	29.2	29.6	27.2	25.0	24.9	24.4	24.5	23.9	22.7	25.5
T mínima aire (°C)	3.6	4.0	5.7	7.6	9.7	12.2	11.7	11.5	11.3	9.3	6.0	4.1	8.1

*29 años de registros.

puntual del suelo (Ibáñez & Saldaña, 2011). La descripción morfológica y los rasgos redoximórficos se basaron en Schoeneberger, Wysocki, Benham, & Broderson, (2002) y USDA-NRCS (2006). El primer suelo fue descrito en 2008 en Ichupio (gleysol); el segundo fue descrito en 2009 en Jarácuaro (fluvisol). Las calicatas se abrieron hasta 110 y 100 cm de profundidad, respectivamente.

Se colectaron muestras de suelo de 2 kg aproximadamente por cada horizonte del perfil. Las muestras fueron envasadas en bolsas de plástico y se trasladaron a laboratorio para el análisis de propiedades físicas y químicas básicas (cuadros 4 y 5). Además, se colectaron muestras del suelo con un cilindro de volumen conocido para determinar la densidad aparente

del suelo (Blake & Hartge, 1986); el suelo se colocó en bolsas de plástico herméticamente selladas para su posterior pesado y secado en el laboratorio.

Descripción morfológica y clasificación de los suelos

La designación de los horizontes se realizó inicialmente en campo con base en la descripción morfológica y propiedades diagnósticas perceptibles de acuerdo con la guía de descripción de suelos de FAO (2009) y se revisaron posteriormente con los análisis de laboratorio. Los suelos se clasificaron con la clave de la Base Referencial del Recurso Suelo (IUSS Grupo de Trabajo, 2007).

Respuesta química del suelo en campo

En los perfiles del suelo y los agregados del mismo se realizaron las siguientes pruebas: pH y conductividad eléctrica (CE) en condiciones de campo en solución 1:1 (agua:suelo) con un medidor portátil marca Hanna®, prueba recomendada en suelos con condiciones de óxido-reducción (Schoeneberger *et al.*, 2002); prueba de reducción del Fe^{++} adicionando solución α , α' dipiridil al 0.2% de (M/V) en una solución de ácido acético al 10% (V/V), registrando la prueba como positiva cuando ocurrió cambio de color o negativa cuando no se desarrolló el color (Schoeneberger *et al.*, 2002). La presencia de carbonatos se realizó adicionando HCl (10%); se registró la efervescencia y la clase de efervescencia presentada se revisó utilizando lupa 10X para observar la presencia o ausencia de carbonatos secundarios. La aplicación de H_2O_2 (30%) se utilizó como indicador de óxidos de manganeso (MnO_2), que en ocasiones están enmascarados por la materia orgánica (Schoeneberger *et al.*, 2002). La presencia de olores a “huevos podridos” se utilizó como indicador de posible presencia de H_2S (sulfuro de hidrógeno) y registrado como indicador de compuestos sulfurosos (USDA-NRCS, 2006). El color de la matriz del suelo en húmedo y de los rasgos redoximórficos fue registrado en campo, utilizando como referencia los cuadros de color estándar de Munsell® (Munsell Soil Color Charts, 2000) sobre un agregado o masa del suelo recién expuesto, con la finalidad de evitar cambios en el color causado por la oxidación del suelo (Schoeneberger *et al.*, 2002).

Análisis en laboratorio

Se analizaron los suelos de acuerdo con métodos estandarizados y por duplicado para todas las propiedades físicas y químicas. Los análisis básicos fueron los siguientes: textura por el método del hidrómetro de Bouyocous (Gee & Bauder, 1986); densidad aparente del suelo por el método del cilindro (Blake & Hartge, 1986); densidad de partículas por

el método del picnómetro (Blake & Hartge, 1986); porosidad total del suelo (Danielson & Sutherland, 1986); materia orgánica y carbono orgánico por combustión húmeda de Walkley y Black (Nelson & Sommers, 1996); CIC por acetato de amonio 1M, pH 7 (Rhoades, 1982); color del suelo seco y húmedo por comparación con los cuadros de Munsell® (Munsell Soil Color Charts, 2000). Por la dificultad que implica medir la conductividad hidráulica en campo en suelos saturados, se estimó para cada horizonte, según el modelo propuesto por Saxton y Rawls (2006), teniendo como parámetros de entrada el porcentaje relativo de la fracción de tierra fina, materia orgánica, densidad aparente y conductividad eléctrica.

Resultados y discusión

Morfología y clasificación del suelo

Morfología del gleyisol de Ichupio

El suelo está conformado por ocho capas con la siguiente secuencia de horizontes: Ao-A-Bg1-Bg2-Bg3-2Wgr1-2Wgr2-2Wgr3. Es un suelo mineral bien desarrollado dominado por arcillas y limos, de estructura predominante de bloques angulares y subangulares de tamaños medios y gruesos desde la superficie y hasta los 36 cm donde se expresa una estructura prismática bien definida hasta los 60 cm, asociado seguramente a una zona con periodos de secado y humedecimiento lento (Ciolkosz & Waltman, 1995). Se continúa una estructura de bloques, asociada con la zona de saturación permanente del suelo. A los 85 cm se presenta una discontinuidad litológica, sin evidencias de que sea material parental diferente al que dio origen al material suprayacente.

El incremento de arcilla en el horizonte B no se asocia a la migración de arcillas, evidenciado por la ausencia de revestimientos, lo que sugiere la formación *in situ*, vinculado posiblemente a los ciclos de secado y humedecimiento. El perfil presenta una coloración uniforme en los primeros 36 cm de color pardo amarillento

en seco y pardo oscuro en húmedo, que corresponde a las capas temporalmente inundadas. No se presentan motas en las primeras cuatro capas, lo que sugiere un carácter óxico. Por debajo de esta profundidad y hasta 90 cm, la matriz del suelo es de color pardo y pardo muy oscuro, en seco y húmedo, respectivamente. Se presenta un contrastante entre la matriz y la expresión de moteados de color rojizo como hiporrevestimientos de pedos y en canales de raíces abandonadas, lo que sugiere una zona con periodos largos de saturación de agua. Las capas más profundas, > 90 cm, presentan colores pardo amarillento a pardo en seco y pardo muy oscuro cuando húmedo, correspondiente a las zonas endosaturadas del manto freático (cuadro 2).

Las condiciones de humedad del suelo no impiden un buen desarrollo de raíces en los primeros 85 cm, siendo abundantes y comunes, de tamaños medios y finos. Sin embargo, a partir de 85 cm, se presentan raíces negruzcas y un fuerte olor sulfuroso o de pudrición de la raíz. Lo anterior sugiere una zona limitante para el desarrollo de las raíces y corresponde con el nivel freático. La conductividad hidráulica saturada al interior del perfil es baja, posiblemente por el alto contenido de arcilla del perfil (> 20%), con valores inferiores de conductividad de 10 mm h⁻¹ en el epipedón e inferior a 4 mm h⁻¹ en el resto del perfil (cuadro 3). Lo anterior sugiere una pedotransferencia de agua y de secado y humedecimiento lento entre horizontes, con zonas interpedales de flujo preferencial.

Discontinuidad litológica del gleysol. Esta discontinuidad se encuentra entre los 85 y 90 cm. Se presenta como acumulación de sedimentos finos, característico de suelos con procesos coluviales. Asimismo, no se tiene evidencia de que sean materiales distintos entre la discontinuidad litológica y los horizontes suprayacente, característicos de las discontinuidades litológicas (Phillips, 2004; FAO, 2009). Por otra parte, esta discontinuidad coincide con la zona donde se observó una limitante para el crecimiento radicular.

Rasgos redoximórficos. Los rasgos redoximórficos del suelo se presentan por debajo de los 27 cm y hasta 110 cm, en donde se exhibe segregación de sesquióxidos de hierro y manganeso sobre la matriz del suelo. En esta zona se forman motas con bordes difusos y colores rojo amarillento (5 YR 5/8), y se presentan como revestimientos sobre los pedos y en zonas interpedales, que contrastan con el color de la matriz del suelo. Además se presentan motas parduzcas de manganeso de bordes difusos y de tamaño pequeño (< 5 cm) (cuadro 2, figura 3). El contraste de luminosidad e intensidad del color de las motas, comparado con la matriz del suelo, es prominente, excepto para la discontinuidad litológica (de 85 a 90 cm). Este moteado sugiere la presencia de lepidocrocita (FeOOH), el cual es un polimorfo metaestable de la goethita (Fanning & Fanning, 1989), además de motas pardas que sugieren la presencia de manganeso. No se detectaron concreciones o durinódulos en el perfil del suelo, lo anterior puede interpretarse como una difusión lenta del oxígeno dentro del perfil y al interior de los agregados, lo cual no ha permitido que se formen las concreciones. Las motas rojizas se localizan principalmente en las partes medias del perfil, mientras que el manganeso se ubica de modo preferente en las zonas bajas del mismo, lo anterior producto de la mayor movilidad del manganeso (Ponnamperuma, 1972).

Reacción del suelo. El pH del suelo presenta heterogeneidad dentro del perfil, siendo ligeramente menor en la zona más profunda. Los valores oscilan entre 7.7 y 8.5, indicando condiciones de basicidad y sin tener condiciones salinas (CE < 0.8 dS m⁻¹). Por otro lado, la CIC del suelo es media (de 15 a 20 Cmol_c kg⁻¹) y saturación de bases > 50% (cuadro 6), siendo los cationes dominantes que saturan la CIC, Mg y K; lo anterior corresponde con un calificador eútrico.

La reacción del suelo fue positiva al alfa dipiridil en todo el perfil durante la época húmeda, lo que sugiere la presencia de hierro reducido (Fe⁺⁺), indicando condiciones reductoras del suelo, así como el olor de

reducción de sulfatos, siendo más fuerte a mayor profundidad. En contraste, durante el periodo de estiaje no se presentó reacción positiva en los horizontes Ao y A1, que corresponde con los horizontes que no desarrollan motas de sesquioxidos.

El suelo presentó condiciones ligeramente calcáreas, pero no se observaron evidencias de carbonatos secundarios y esta reacción se debe a restos de conchas de moluscos distribuidos a lo largo del perfil del suelo.

Clasificación. Con base en la descripción de campo y los resultados analíticos del laboratorio (cuadros 2, 4, 5 y 6), el suelo fue clasificado como *gleysol háplico* (colúvico, éutrico) en WRB (2006). El patrón de colores rojizos y parduzcos en la cara de los agregados y entre los agregados, y los indicadores de condiciones reductoras fue un diagnóstico para clasificarlos como *gleysol*. La presencia de una discontinuidad y arreglo irregular de las arenas le da un carácter colúvico. Finalmente, la saturación de bases mayor a 50% (cuadro 6) determina el calificador éutrico.

Morfología del fluvisol de Jarácuaro

El suelo presentó la siguiente secuencia de horizontes genéticos: Ah-Ae1-Ae2-Ae3-Ar-Wr. Sobresale un epipedón bioturbado que forma costras poligonales de 5 cm de profundidad cuando la superficie está seca; contiene 42% de arcilla y 21% de limos y material fibrico

compuesto principalmente de raíces muertas (figura 3). El suelo forma grietas reversibles desde la superficie y hasta una profundidad de 30 cm, donde el suelo es húmedo por el movimiento capilar del agua de la capa freática. Las grietas son suficientemente amplias (> 1 cm) como para permitir la aireación de tales estratos cuando el suelo está seco. La estructura es masiva en húmedo y de poliedros angulares cuando se expone suelo, siendo muy dura cuando está seco, a pesar de los altos contenidos de materia orgánica (> 7%). Los agregados no forman cuñas y no se pudieron apreciar caras de fricción.

El color de la matriz del suelo fue negro (10 YR 2/1), variando a pardo muy oscuro con la profundidad (10 YR 2/2) cuando está húmedo, y de pardo grisáceo (10 YR 5/2) a pardo amarillento claro (10 YR 6/2-4) cuando está seco. Los contenidos de materia orgánica son de 11% en la superficie, disminuyendo gradualmente con la profundidad ($\pm 7.0\%$). El suelo presentó pocas gravas gruesas (< 5 cm) de tipo subangular y color blanquecino de arreglo irregular, inmersas en la matriz del suelo, que sugieren su origen fluvial. Si bien los estratos sedimentarios no son fácilmente observables en campo, los sedimentos sugieren procesos de baja energía (pendiente < 2%), que enmascaran las secuencias del depósito mineral (Bradley & Stolt, 2003).

Presenta una textura al tacto arcillo arenosa en todo el perfil, con contenidos de arcilla >



Figura 3. a) Perfil del gleysol, Ichupio; b) agregado prismático del gleysol, mostrando rasgos hidromórficos; c) perfil del fluvisol.

Cuadro 2. Morfología del gleysol de Ichupio.

Horizonte profundidad, cm	Rasgos del suelo
Horizonte Ao 0 - 10	Color en seco (10 YR 5/4 pardo amarillento), color en húmedo (7.5 YR 3/2 pardo oscuro), sin presencia de motas. Textura al tacto franco-arenosa; estructura moderada granular y en bloques subangulares medios; consistencia firme, no adhesiva, ligeramente plástica; sin pedregosidad; poros abundantes finos y medios; ligero desarrollo de óxidos en bioporos; raíces abundantes y delgadas; drenaje lento, transición al siguiente horizonte tenue, ondulado.
Horizonte A 10 - 15	Color en seco (10YR 5/6 pardo amarillento), color en húmedo (7.5 YR 3/2 pardo oscuro), sin presencia de motas; textura al tacto franco-arenosa; estructura moderada en bloques subangulares medios; consistencia firme, no adherente, ligeramente plástica; sin pedregosidad; poros abundantes medios y finos (poros canales de raíces); ligero desarrollo de óxidos en bioporos; raíces medias y finas; drenaje lento; transición al siguiente horizonte difuso por color y marcado por dureza; forma del límite horizontal ondulado.
Horizonte Bg1 15 - 27	Color en seco (10YR 5/6 pardo amarillento), color en húmedo (7.5 YR 3/3 pardo obscuro), sin presencia de motas; textura al tacto arcillo-limoso; estructura moderada en bloques subangulares medios y gruesos; consistencia firme, adherencia media, ligeramente plástica; sin pedregosidad; porosidad media (poros canales de raíces); ligero desarrollo de óxidos en bioporos; raíces abundantes y delgadas; presencia de restos de conchas; drenaje lento; transición al siguiente horizonte horizontal ondulado marcado por dureza.
Horizonte Bg2 27 - 36	Color en seco (10YR 5/6 pardo amarillento), color en húmedo (7.5 YR 3/3 pardo oscuro), sin presencia de motas; textura al tacto arcillo-limoso; estructura fuerte en bloques subangulares de tamaño grande; consistencia firme más estable que el anterior, moderadamente adhesiva y moderadamente plástica; pedregosidad, pocas < 5% de 2 a 5 cm, redondeadas; porosidad media (poros canales de raíces); raíces finas y comunes; moderado desarrollo de óxidos de hierro en macroporos, mesoporos y bioporos de color (5 YR 5/8 rojo amarillento); bivalvos y caracoles muertos; drenaje lento; transición al siguiente horizonte marcado por color y textura; forma del límite horizontal ondulado.
Horizonte Bg3 36 - 60	Color en seco (7.5 YR 5/4 pardo), color en húmedo (7.5 YR 4/4 pardo); presencia de motas en masas como bandas rojizas (5 YR 5/8 rojo amarillento); abundantes externos e internos de los agregados; textura al tacto arcillosa; estructura fuerte prismática de tamaño muy gruesa > 20 cm; consistencia muy firme, muy adhesiva y muy plástica; sin pedregosidad; poros muy pocos; tubulares dendríticos por raíces; presencia de vacíos interpedales entre prismas cuando no está saturado de 3 a 4 cm de profundidad y < 1 cm de ancho; no se observan revestimientos ni rasgos de tensión, ni caras de deslizamientos entre agregados; raíces comunes y delgadas; presencia de bivalvos y caracoles muertos en menor cantidad que el anterior; drenaje; transición al siguiente horizonte marcado por color; forma del límite horizontal irregular.
Horizonte 2Wgr1 60 - 85	Color en seco (7.5 YR 5/4 pardo), color en húmedo (7.5 YR 2.5/3 pardo muy oscuro); presencia de motas comunes en masas como bandas rojizas (5 YR 5/8 rojo amarillento) en menor cantidad que el anterior, al interior de los agregados y como hiporevestimientos; textura al tacto arcillosa; estructura fuerte en bloques angulares y subangulares; tamaño medios y gruesos; consistencia muy firme, muy adhesiva y muy plástica; sin pedregosidad; poros finos tubulares dendríticos medios pocos; raíces comunes medias; sin drenaje, zona de saturación; transición al siguiente horizonte marcado por color; forma del límite horizontal ondulado.
Horizonte 2Wgr2 85 - 90	Color en seco (10 YR 5/8 pardo amarillento), color en húmedo (10 YR 3/3 pardo oscuro), sin presencia de motas; textura al tacto arenosa; sin estructura; sin consistencia, sin adherencia ni plasticidad; sin pedregosidad; porosidad intersticial alta, con ausencia de motas y concentraciones; raíces comunes medias, algunas en estado de putrefacción; presencia de olor sulfuroso, sulfuro de hidrógeno (olor a huevo podrido); sin drenaje (capa freática); transición al siguiente horizonte marcado por textura abrupta; forma del límite horizontal ondulado.
Horizonte 3Wgr3 90 - 110	Color en seco (7.5 YR 5/4 pardo), color en húmedo (7.5 YR 3/3 pardo oscuro); presencia de motas sobre algunos agregados en menor cantidad que los suprayacentes de color (5 YR 5/8 rojo amarillento); textura al tacto arcillosa; estructura fuerte con forma de bloques angulares de tamaño grueso; consistencia firme, moderadamente adhesiva y moderadamente plástica; sin pedregosidad; porosidad media (poros canales de raíces); raíces medias en estado de putrefacción, fuerte olor sulfuroso; permanentemente saturado por agua.

28% y distribución irregular de las arenas, lo que sugiere su origen flúvico. La porosidad promedio del perfil es muy alta (55%), de abundantes poros finos, disminuyendo hasta una profundidad de 44 cm. Por debajo de los 44 cm de profundidad se presentan notorios macroporos no asociados con raíces; son de tipo vesiculares no dendríticos en su mayoría, que puede interpretarse como formación de gases que escapan a manera de burbujas, dejando a su paso estas singulares formaciones. Además, a los 44 cm de profundidad se encuentra el nivel freático. La porosidad le confiere valores muy altos de conductividad hidráulica saturada, con tasas de $> 30 \text{ mm h}^{-1}$, que permite flujos de agua rápidos a través de los horizontes. Las raíces del suelo son comunes y delgadas en los primeros 20 cm, siendo raras por debajo de esta profundidad, y se presenta restricción para su crecimiento por debajo de los 44 cm, justo sobre el nivel freático. Tiene una densidad aparente muy baja (de 0.7 a 0.8 g cm^{-3}) en toda la profundidad y una densidad real de 1.9 a 1.6 g cm^{-3} , asociado seguramente con los altos contenidos de materia orgánica (cuadro 5). Por otro lado, se observaron restos de conchas en todo el perfil, disminuyendo a mayor profundidad, y presenta reacción al HCl, pero no se observaron carbonatos secundarios.

Rasgos redoximórficos. Presenta una matriz empardecida con colores de 10 YR 5/2 y 10 YR 6/2-4 en seco, y de 10 YR 2/1-2 en húmedo, medianamente reducida con intensidad de color de 6 a 2 y *brillantez* menor de 4, pero posiblemente enmascarada por los altos contenidos de materia orgánica ($> 7\%$) en todo el perfil. No se apreciaron segregaciones de sesquióxidos ferromanganesos o de durinódulos en la matriz y agregados del suelo, pero presenta moteados que corresponden a materia orgánica en estado intermedio de descomposición, que se deshacen al friccionarlos entre los dedos.

No se descartan colores característicos de las condiciones reductimórficas, sin embargo es posible que se encuentren enmascarados por los niveles altos de materia orgánica, como se

ha reportado en otros suelos (Ponnamperuma, 1972; Fanning & Fanning, 1989; Grimley & Vepraskas, 2000).

Reacción del suelo. El suelo es de reacción alcalina, con valores de entre 8.8 de pH en la superficie a 8.2 en las capas profundas, y una CE con valores $< 1.3 \text{ dS m}^{-1}$, descartando salinidad del suelo. Presenta reacción positiva al alfa, alfa dipiridil durante todo el año, de manera más evidente a mayor profundidad, que sugiere acumulación de hierro reducido. El suelo reaccionó levemente, pero de manera persistente, al H_2O_2 en todo el perfil, sugiriendo manganeso reducido libre en la matriz del suelo. Se presenta fuerte olor sulfuroso (olor a huevo podrido) en los horizontes preferentemente por debajo de los 30 cm.

Clasificación. El suelo fue clasificado como un fluvisol háplico (hiperhúmico, éutrico) de acuerdo con la WRB (2006). El suelo fue clasificado como fluvisol por contener material flúvico, evidenciado por la distribución irregular de fragmentos rocosos y de las arenas al interior del pedón; además, presenta un calificador hiperhúmico por los altos contenidos de materia orgánica ($> 7\%$); finalmente, un calificador del tipo éutrico por tener saturación de bases mayor de 50% en todo el perfil (cuadro 6).

La modificación más importante en la clasificación del suelo, con respecto a lo reportado por la cartografía del INEGI, fue el cambio de unidad de gleysol a fluvisol.

Conclusión

Los suelos del humedal de Ichupio son suelos derivados de procesos coluviales, con un desarrollo estructural bien definido, comparado con los suelos del humedal de Jarácuaro, derivado de procesos sedimentarios de baja energía. Los suelos estudiados presentan un nivel freático somero, y periodos alternados de secado y humedecimiento en las capas superiores, que influye de manera importante en los rasgos redoximórficos y en la estructura de sus horizontes. En el caso de los suelos del humedal de Ichupio, han formado

Cuadro 3. Morfología de fluvisol de Jarácuaro.

Horizonte profundidad, cm	Rasgos del suelo
Horizonte Ah 0 - 5	Color en seco (10YR 5/2 pardo grisáceo), color en húmedo (10YR 2/1 negro); sin presencia de motas ni concreciones; textura al tacto arcillo-arenoso; estructura laminar formando una costra de tamaño medio (5 cm promedio) reversible, iniciada desde la superficie, extremadamente fuerte; consistencia extremadamente firme en seco, moderadamente adhesiva y plástica; sin pedregosidad; poros abundantes y finos; raíces comunes y delgadas con presencia de materia fíbrico; drenaje lento; transición al siguiente horizonte abrupto por la costra horizontal.
Horizonte Ae1 5 - 12	Color en seco (10YR 5/2 pardo grisáceo), color en húmedo (10YR 2/2 pardo muy oscuro); sin presencia de motas ni concreciones; grietas reversibles a través del horizonte; textura al tacto arcillo-arenoso; estructura fuerte de forma, masiva en húmedo y poliedros medios en seco; consistencia muy firme, moderadamente adhesiva, ligeramente plástica; pedregosidad, muy pocas; poros abundantes finos; raíces comunes y delgadas, y presencia de material fíbrico y restos de conchas de conchas; drenaje lento; transición al siguiente horizonte marcado por color y estructura.
Horizonte Ae2 12 - 20	Color en seco (10 YR 5/2 pardo grisáceo), color en húmedo (10YR 2/2 pardo muy oscuro); sin presencia de concreciones; moteado por material orgánico moderadamente descompuesto de tipo hémico, mezclado por bioturbación (pisoteo de ganado); grietas reversibles iniciadas en la superficie; textura al tacto arcillo-arenoso; estructura fuerte de forma masiva en húmedo y bloques subangulares medios en seco; consistencia muy firme, moderadamente adhesiva, ligeramente plástica; pedregosidad, muy pocas; poros abundantes finos; raíces comunes y finas; restos de conchas de caracol; drenaje lento; transición al siguiente horizonte tenue.
Horizonte Ae3 20 - 30	Color en seco (10YR 5/2 pardo grisáceo), color en húmedo (10YR 2/2 pardo muy oscuro); sin presencia de concreciones; moteado por material orgánico moderadamente descompuesto de tipo hético, mezclado por bioturbación (pisoteo de ganado); grietas reversibles iniciadas desde la superficie; textura al tacto arcillo-arenoso; estructura fuerte de forma masiva en húmedo y bloques subangulares medios en seco; consistencia muy dura, adhesiva y plástica; pedregosidad, muy pocas; poros pocos, finos; raíces raras medias; restos de conchas de caracol; drenaje lento; transición al siguiente horizonte tenue por color y abrupto por ausencia de grietas.
Horizonte Ar 30 - 44	Color en seco (10YR 6/2 pardo amarillento claro), color en húmedo (10YR 3/2 pardo grisáceo muy oscuro); sin presencia de concreciones ni moteado; textura al tacto arcillo-arenoso; estructura fuerte masiva en húmedo y bloques subangulares medios en seco; consistencia muy dura, moderadamente adhesiva y plástica; pedregosidad, muy pocas; poros pocos, finos; raíces muy raras, medias; restos de conchas de caracol; fuerte olor sulfuroso (olor a huevo podrido); drenaje lento, transición al siguiente horizonte tenue en color y textura, y marcado por la ausencia de grietas.
Horizonte Wr 44 - 100	Color en seco (10YR 6/4 pardo amarillento claro), color en húmedo (10YR 2/2 pardo muy oscuro); sin presencia de concreciones ni moteado; textura al tacto arcillo-arenoso; estructura fuerte masiva vesicular en húmedo y seco; consistencia muy dura, moderadamente adhesiva y plástica; sin pedregosidad; poros pocos y finos; raíces muy raras, medias; restos de conchas de caracol, fuerte olor sulfuroso; sin drenaje, nivel estático de la capa freática (agua libre dentro del perfil); transición al siguiente horizonte tenue.

estructuras bien desarrolladas de tipo de los bloques y prismas, mientras que en el humedal de Jarácuaro es masiva y dura su estructura, pese a los altos contenidos de materia orgánica.

Los suelos de Ichupio han expresado rasgos redoximórficos en la mayoría de sus horizontes, derivado de la segregación de sesquióxidos de fierro y manganeso, indicando condiciones de secado y humedecimiento alternado. Por su parte, los suelos del humedal de Jarácuaro

presentaron acumulación de materia orgánica, siendo reservorios de carbono, y enmascarando posiblemente los rasgos redoximórficos por los contenidos altos de materia orgánica. En el fluvisol sobresalen en la zona más baja poros de tipo vesicular no asociados con raíces y fuerte olor sulfuroso, que sugiere la formación de gases como el metano, formando burbujas que escapan del suelo, dejando estos rasgos característicos.

Cuadro 4. Propiedades químicas de los suelos de humedal.

Perfil	Horizonte genético	Prof. cm	pH campo	MO %	CO %	CE dS m ⁻¹	Humedad campo (V/V)	Reacciones en campo		
								α , α dip-iridil	H ₂ O ₂ *	HCl**
Ichupio (gleysol)	Ao	0 - 10	8.5	2.2	1.2	0.8	21.6	- , +	++	MO
	A	10 - 15	7.9	1.4	0.8	0.5	20.9	- , +	++	MO
	Bg1	15 - 27	7.8	1.1	0.6	0.3	22.0	+	++	MO
	Bg2	27 - 36	8.0	1.2	0.7	0.2	25.8	+	++	MO
	Bg3	36 - 60	8.4	1.1	0.6	0.2	24.7	+	++	SL
	2Wgr1	60 - 85	7.7	0.8	0.5	0.2	24.9	+	++	SL
	2Wgr2	85 - 90	7.7	0.7	0.4	0.2	19.4	+	+++	MO
	2Wgr3	90 - 110	7.7	0.8	0.4	0.2	28.0	+	+++	MO
Jarácuaro (fluvisol)	A	0 - 5	8.8	11.3	6.6	1.3	9.6	+	++	MO
	Ae1	5 - 12	8.5	9.9	5.7	0.7	57.2	+	++	MO
	Ae2	12 - 20	8.4	9.1	5.3	0.4	62.5	+	++	MO
	Ae3	20 - 30	8.4	8.5	4.9	0.4	67.5	+	++	MO
	Ar	30 - 44	8.3	8.1	4.7	0.3	62.0	+	++	MO
	Wr	44 - 100	8.2	7.2	4.2	0.2	181.1	+	++	MO

* - Negativo; + =, reacción leve; ++ =, reacción fuerte; +++ =, reacción muy fuerte.

**Reacción del carbonato en la matriz del suelo: N = no calcáreo, no detectable visiblemente ni efervescencia audible; SL = ligeramente calcáreo, se escucha la efervescencia, pero no es visible; MO = moderadamente calcáreo, efervescencia visible; ST = fuertemente calcáreo, efervescencia fuertemente visible, las burbujas forman poca espuma; EX = extremadamente calcáreo, reacción extremadamente fuerte, se forma la espuma espesa rápidamente (FAO, 2009). CIC = capacidad de intercambio catiónico total.

Cuadro 5. Propiedades físicas de los suelos de humedal.

Perfil	Horizonte genético	Prof. cm	Textura (%)			Clase textural*	Densidad aparente (g cm ⁻³)	Densidad real (g cm ⁻³)	Poros (%)	CHS** (mm h ⁻¹)
			Arena	Limo	Arcilla					
Ichupio (gleysol)	Ao	0 - 10	53	33	14	Fa	1.1	2.4	38	9.6
	A	10 - 15	41	39	20	F	1.4	2.3	42	3.7
	Bg1	15 - 27	23	57	20	Fl	1.4	2.3	45	3.0
	Bg2	27 - 36	19	57	24	Fl	1.0	2.3	44	3.5
	Bg3	36 - 60	31	39	29	Fa	1.0	2.3	37	2.0
	2Wgr1	60 - 85	11	61	27	Fal	1.2	2.4	46	2.5
	2Wgr2	85 - 90	67	27	6	Fa	1.2	2.3	45	37.9
	2Wgr3	90-110	41	39	20	F	1.2	2.3	38	3.6
Jarácuaro (fluvisol)	Ah	0 - 5	37	21	42	Ar	0.8	1.9	55	24.1
	Ae1	5 - 12	47	25	28	Far	0.8	1.8	54	26.1
	Ae2	12 - 20	28	34	38	Far	0.8	1.6	49	16.9
	Ae3	20 - 30	32	35	33	Far	0.8	1.9	57	20.9
	Ar	30 - 44	44	28	28	Far	0.7	1.7	58	35.7
	Wr	44-100	47	14	38	Ar	0.7	1.6	55	32.2

*F = franco; Fa = franco arenoso; Fl = franco limoso; Fal = franco arcillo limoso; Far = franco arcilloso; Mar = migajón arcilloso; Mal = migajón arcillo limoso; Al = arcilla limosa; Ma = migajón arenoso; Ar = arcilloso.

**CH = conductividad hidráulica.

Finalmente, los humedales de Ichupio fueron clasificados como gleysols, como son reportados anteriormente por el INEGI; sin

embargo, los humedales de Jarácuaro cambian de unidad, de gleysol a fluvisol.

Cuadro 6. Propiedades químicas de los suelos de humedal.

Perfil	Horizonte genético	Prof. cm	CIC Cmol _c kg ⁻¹	Ca ⁺⁺ Cmol _c kg ⁻¹	Mg ⁺⁺ Cmol _c kg ⁻¹	Na ⁺ Cmol _c kg ⁻¹	K ⁺ Cmol _c kg ⁻¹	SB %
Ichupio (gleysol)	Ao	0 - 10	15	5.9	4.1	0.6	2.4	86.5
	A	10 - 15	20	6.2	3.4	1.5	2.1	65.5
	Bg1	15 - 27	19	6.7	3.4	1.3	1.6	68.6
	Bg2	27 - 36	18	8.2	3.6	1.6	2.2	86.7
	2Wgr1	36 - 60	20	6.4	4.0	1.4	1.7	67.4
	2Wgr2	60 - 85	19	5.7	4.5	1.7	1.8	71.8
	2Wgr3	85 - 90	16	4.2	4.4	1.2	1.6	71.0
	Ah	90 - 110	16	3.8	4.4	1.1	1.8	69.5
Jarácuaro (fluvisol)	A	0 - 5	44	9.6	7.3	4.6	4.2	58.4
	Ae1	5 - 12	40	9.4	7.1	4.2	3.9	61.2
	Ae2	12 - 20	39	9.6	5.5	3.5	2.9	55.2
	Ae3	20 - 30	37	9.8	5.6	3.5	2.5	57.9
	Ar	30 - 44	36	7.5	4.7	2.2	2.1	46.1
	Wr	44 - 100	34	8.2	5.6	3.3	2.0	56.4

Agradecimientos

Se agradece al proyecto *Focos rojos de gases con efecto de invernadero en México: estructura y funcionamiento de los suelos saturados de humedad Semarnat-Conacyt 23489* y al proyecto PAPIIT-IN224410: *estructura y funcionamiento de la materia orgánica en suelos de humedales: importancia de los almacenes de carbono en ecosistemas tropicales costeros*.

Referencias

- Bello, R. R., García, N. E., Ortega, H. M., & Krasilnikov, P. (2011). Artificial *Chinampas* Soils of Mexico City: their Properties and Salinization Hazards. *Spanish Journal of Soil Science*, 1(1). DOI: 10.3232/SJSS.2011.V1.N1.05.
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Bulk Density. In A. Klute (Ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods* (pp. 363-375). 2nd edition. Monograph N° 9. Madison: Soil Science Society of America.
- Bradley, M. P., & Stolt, M. H. (2003). Subaqueous Soil-Landscape Relationship in Rhode Island Estuary. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67, 1487-1495.
- Ciolkosz, E. J., & Waltman, W. J. (1995). *Cambic Horizons in Pennsylvania Soils* (26 pp.). Agronomy Series Number 133. University Park. USA: Agronomy Department, The Pennsylvania State University.
- Danielson, R. E., & Sutherland, P. L. (1986). Bulk Density. In: A. Klute (Ed). *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. 2nd Edition. Monograph N° 9. Madison: Soil Science Society of America.
- Driessen, P., Deckers, J., Spaargaren, O., & Nachtergaele, F. (2001). *Lecture Notes on the Major Soils of the World* (334 pp.). Rome: FAO.
- FAO (2009). *Guía para la descripción de suelos* (99 pp.). 4^a ed. Rome, Wageningen (The Netherlands): FAO, ISRIC.
- Garduño-Monroy, V. H., Chávez-Hernández, J., Aguirre-González, J., Vázquez-Rosas, R., Mijares-Arellano, H., Israde-Alacántara, I., Hernández-Madrigal, V. M., Rodríguez-Pascua, M. A., & Pérez-López, R. (2009). Zonificación de periodos naturales de oscilación superficial en la ciudad de Pátzcuaro, Mich., México, con base en microtemores y estudios de paleosismología. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 6(3), 623-637.
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-Size Analysis. In A. Klute (Ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods* (pp. 383-411). 2nd edition. Monograph N° 9. Madison: Soil Science Society of America.
- Grimley, D. A., & Vepraskas, M. J. (2000). Magnetic Susceptibility for Use in Delineating Hydric Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64, 2174-2180.
- Gutiérrez, C. Ma. C., Stoops, G., & Ortiz, C. A. (1998). Carbonatos de calcio en los suelos del ex lago de Texcoco. *Terra*, 16(1), 11-19.
- Gutiérrez, C. Ma. C., & Zavala, J. (2001). Rasgos hidromórficos de suelos tropicales contaminados con hidrocarburos. *Terra Latinoamericana*, 20, 101-111.
- Israde-Alcántara, I., Garduño-Monroy, V. H., Fisher, C. T., Pollar, H. P., & Rodríguez-Pascua, M. A. (2005). Lake Level Change, Climate, and the Impact of Natural Events: The Role of Seismic and Volcanic Events in the Formation of the Lake Patzcuaro Basin, Michoacan, Mexico. *Quaternary International*, 135, 35-46.

- WRB (2007). *World Reference Base for Soil Resources 2006, first update 2007* (128 pp.). Iuss Working Group, World Soil Resources Reports No. 103. Rome: FAO.
- Ibáñez, J. J., & Saldaña, A. (2011). Capítulo 9. Edafodiversidad: concepto, estimación y utilidad en el análisis global de suelos (145-172 pp.). In P. Krasilnikov, F. J. Jiménez, T. Reyna, & N. E. García (Eds.). *Geografía de suelos de México*. México, DF: UNAM.
- Munsell Soil Color Charts (2000). *Revised Washable Edition*. New Windsor: Gretag Macbeth.
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Total Carbon, Organic Carbon and Organic Matter. In D. L. Sparks (Ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods* (pp. 573-579). Monograph N° 5. Madison: Soil Science Society of America.
- Ortiz, S. C. A., Gutiérrez, C. Ma. C., López, A. G., Rodríguez, T. S. A., & Segura, M. A. (2000). *Guía de la gira técnica en el Municipio de Texcoco, México*. Congreso Universitario Internacional de Edafología, "Nicolás Aguilera", octubre.
- Phillips, J. D. (2004). Geogenesis, Pedogenesis, and Multiple Causality in the Formation of Texture-Contrast Soils. *Catena*, 58, 275-295.
- Ponnamperuma, F. N. (1972). The Chemistry of Submerged Soils. *Advances in Agronomy*, 24, 96.
- Ramos, A. R. (2008). *Relación entre el tiempo de cambio de uso y el nivel de degradación de suelos en la cuenca de Cointzio Michoacán* (108 pp.). Tesis de Maestría en Conservación y Manejo de Recursos Naturales. Morelia, México: Universidad Michoacana de san Nicolás de Hidalgo (UMSNH).
- Ramos, B. R., Cajuste, L. J., Flores, D., García, N. E. (2001). Metales pesados, sales y sodio en suelos de chinampa en México. *Agrociencia*, 35(4), 385-395.
- Reyes-Ortigoza, A. L. & García-Calderón, N. E. (2004). Evolución de las fracciones húmicas de suelos en la zona chinampera de la ciudad de México. *Terra Latinoamericana*, 22(3), 289-298.
- Rhoades, J. D. (1982). Cation Exchange Capacity. In A. L. Page, R. H. Miller, & D. R. Keeney (Eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Agron. Monogr. 9.* (pp. 149-157). Madison: Am. Soc. Agron.
- Rivera, C. M. del C., Ferrera, R., Volker, V., Fernández, L., & Rodríguez, R. (2002). Poblaciones microbianas en perfiles de suelos afectados por hidrocarburos del petróleo en el estado de Tabasco. *Agrociencia*, 36(2), 149-160.
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70, 1569-1578. Doi:10.2136/sssaj2005.0117.
- Schoeneberger, P. J., Wysocki, D. A., Benham, E. C., & Broderson, W. D. (Eds.) (2002). *Field Book for Describing and Sampling Soils, version 2.0*. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- USDA-NRCS (2006). *Field Indicators of Hydric Soils in the United States, version 6.0*. G. W. Hurt & L. M. Vasilas (Eds.). United States Department of Agriculture (USDA), Natural Resources Conservation Service (NRCS), in Cooperation with the National Technical Committee for Hydric Soils.
- Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E., Fedick, S. L., Gama-Castro, J., Palacios-Mayorga, S., & Vallejo-Gómez, E. (2007). Soil Genesis in Relation to Landscape Evolution and Ancient Sustainable Land Use in the Northeastern Yucatán Peninsula, Mexico. *Atti. Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem., Serie A*, 112, 115-126.
- Segura, C. M. A., Gutiérrez, M. del C., Ortiz, C. A., David, Y., & Gómez, J. (2000). Suelos arcillosos de la zona oriente del estado de México. *Terra Latinoamericana*, 18(1), 35-44.
- Solleiro-Rebolledo, E., Cabadas-Báez, H. V., González, A., Fedick, S. L., Chmilar, J. A., & Leonard, D. (2011). Genesis of Hydromorphic Calcisols in Wetlands of the Northeast Yucatan. *Geomorphology*, 135, 322-331. Doi:10.1016/j.geomorph.2011.02.009.
- Van Diepen, C. A. (1984). *Wetland Soils of the World, their Characterization and Distribution in the FAO-UNESCO Approach* (23 pp.). VII International Soil Classification Workshop on Characterization, Classification and Utilization of Wetland Soil. Los Banos, Philippines, March 26 to April 16.

Dirección institucional de los autores

M.C. Lenin E. Medina-Orozco

Licenciatura en Genómica Alimentaria
Universidad de la Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo
Avenida Universidad # 3000
59000 Sahuayo, Michoacán, México
Teléfono: +52 (353) 5320 762
leninmed@gmail.com

Dra. Norma E. García-Calderón

Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación
Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Autónoma de México
Boulevard Juriquilla # 3001
76230 Juriquilla, Querétaro, México
Teléfono: +52 (442) 1926 201
negc@ciencias.unam.mx

Dr. Felipe García-Oliva

Centro de Investigaciones en Ecosistemas
Instituto de Biología
Universidad Nacional Autónoma de México
Antigua carretera a Pátzcuaro # 8701
Col. ExHacienda de San José de la Huerta
58190 Morelia, Michoacán, México
Teléfono: +52 (443) 3222 704
fgarcia@cieco.unam.mx

Dra. Elena Ikkonen

Academia Rusa de las Ciencias
Petrozavodsk
185610 RUSIA
Teléfono: (8142) 769 810
likkonen@gmail.com



[Haga clic aquí para escribir al autor](#)

Percepciones y realidades de la contaminación en la comunidad minera San José de Avino, Durango

• María de Lourdes Corral-Bermúdez • †Noelia Rivera-Quintero •
• Eduardo Sánchez-Ortiz* •

Instituto Politécnico Nacional, México

*Autor de correspondencia

Resumen

Corral-Bermúdez, M. L., †Rivera-Quintero, N., & Sánchez-Ortiz, E. (septiembre-octubre, 2014). Percepciones y realidades de la contaminación en la comunidad minera San José de Avino, Durango. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(5), 125-140.

En la localidad de San José de Avino se presenta un fenómeno de contaminación del agua atribuido a la actividad minera. Los primeros en detectarlo fueron los pobladores debido a la coloración del arroyo por los derrames de algunas de las norias con las que tradicionalmente se abastecían de agua potable; de forma inicial, ellos han supuesto alguna inobservancia normativa de la actividad minera que tiene una antigüedad de casi 500 años. Esto provocó tensiones entre los pobladores y la minera, que ha demandado en diversas ocasiones la intervención de la autoridad sin que se haya dado una explicación al origen del fenómeno y aún menos una solución, perdiéndose en el debate entre las causas de origen natural y el origen antropogénico. En esta investigación se analizó la percepción de los pobladores y de los dueños de la mina sobre el problema y además se logró demostrar que el fenómeno sí es originado por la actividad minera; sin embargo, no obedece al incumplimiento normativo, por el contrario, dado que la reglamentación se orienta principalmente a los procesos de beneficio del mineral y sus desechos, ha dejado de lado las actividades preliminares, como la formación de terraplenes de material considerado inerte, que en este caso particular aporta importantes cantidades de metales pesados al entorno por lixiviación que requerirían una sistemática regulación, ya que las manifestaciones de impacto ambiental referidas a los "terrones" pueden ser aprobadas sin contemplar estos aspectos.

Palabras clave: contaminación minera, normatividad ambiental, percepciones ambientales.

Abstract

Corral-Bermúdez, M. L., †Rivera-Quintero, N., & Sánchez-Ortiz, E. (September-October, 2014). Perceptions and Realities about Pollution in the Mining Community of San José de Avino, Durango. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(5), 125-140.

Water pollution in the town of San José de Avino has been attributed to mining activity. Residents were the first to detect it due to the color of a stream coming from some of the wells that traditionally supplied drinking water. They initially presumed that norms regulating mining activity (which has been conducted for 500 years) have not been observed. This created tensions between the residents and the mining company, demanding on several occasions the intervention of the authority. No explanation was being provided as to the origin of the pollution or a solution, with the focus getting lost in the debate about natural versus anthropogenic origins. This investigation analyzed the perception of residents and mine owners about the problem and demonstrated that the pollution was caused by mining activity. Nevertheless, it did not occur as a result of failure to follow regulations. The regulations were primarily aimed at processes regarding the benefit of the mineral and its waste. The preliminary activities had been set aside. For example, in this particular case, banks of inert material have formed which have released significant amount of heavy metals into the environment due to leaching. This would require systematic regulation. The environmental impact statements related to "dumps" can be approved without considering these factors.

Keywords: Mining pollution, environmental regulations, environmental perceptions.

Recibido: 11/06/13
Aceptado: 04/03/14

Introducción

El poblado de San José de Avino se ubica en la parte central del municipio de Pánuco de Coronado en el estado de Durango, México. Su origen está estrechamente relacionado con la actividad minera, uno de los motivos de la expansión de la corona española. Sin embargo, la intermitencia de esta actividad industrial ha desvinculado la dependencia económica del poblado con ella. En la actualidad, la mayor parte de la población se dedica a la agricultura y ganadería.

En el poblado existen varias norias que antiguamente fueron la única fuente de abastecimiento de agua para consumo humano. A la fecha, el pueblo cuenta con una galería filtrante conectada a la red de suministro, sin embargo subsisten algunas norias como fuente de abastecimiento de las viviendas en la parte más antigua del lugar.

En años recientes, los pobladores se preocuparon porque de algunas de las norias que funcionan como pozo artesiano comenzó a aflorar agua con un cada vez más intenso color verde esmeralda, dándole este aspecto al arroyo que forma con sus derrames. Comenzaron a relacionar este fenómeno con la actividad minera, convencidos porque la presencia de las evidencias de contaminación se detectaron al tiempo de un periodo de reactivación de la explotación de la mina.

Lo anterior generó una serie de tensiones entre los habitantes y la empresa, que no ha llegado a mayores, pero que sigue latente. En diversos momentos los habitantes han solicitado la intervención de las autoridades y de algunas instituciones, suponiendo que la forma en que se explota el mineral contamina el agua subterránea.

Por su parte, la empresa minera manifiesta que este fenómeno tiene bastante tiempo y que incluso se inició durante un receso de sus actividades, por lo que se deslinda de responsabilidades, señalando que cumple con todas las disposiciones normativas en la materia.

Económicamente hablando, la actividad minera es la más importante, seguida de la

ganadería y la agricultura, por lo que un eventual cierre de la mina debido a la presión social supondría un deterioro importante en la economía de la zona y, a la vez, los efectos de la contaminación pueden estar afectando las otras actividades sustantivas de la localidad.

Por tanto, esta investigación tiene como propósito general describir, a partir de indicadores sociales y ambientales, el impacto del vacío de la regulación, mediante los siguientes objetivos particulares:

1. Dimensionar la percepción social del problema.
2. Evaluar el tipo y los niveles de contaminación en el agua.
3. Identificar el origen de la contaminación del agua.

Todo lo anterior bajo circunstancias de poca disponibilidad de la empresa para abrir sus puertas y verificar sus operaciones, y de desconfianza por parte de la población.

La investigación se llevó a cabo bajo la hipótesis de que de la contaminación del agua es de origen antropogénico y se debe a un vacío normativo; para ello se recabó información documental y de campo. La primera fue obtenida de instituciones oficiales, como el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y el Servicio Geológico Mexicano (SGM), además de revisar los aspectos normativos; mientras que la información de campo comprendió toma de muestras de agua y el levantamiento de una encuesta en la localidad de San José de Avino. A su vez, mediante la utilización de sistemas de información geográfica, se sobrepusieron varios temas para el análisis y se definió elaborar un perfil geohidrológico, que permitió una visualización más completa de lo que probablemente sucede.

Metodología

Estudios preliminares

Se hizo una búsqueda documental de la información demográfica registrada por el

INEGI, así como diversas capas de información vectorial topográfica, geológica, hidrológica, etcétera. En el Servicio Geológico Mexicano se obtuvo información y antecedentes de la actividad minera, las exploraciones y los diversos contenidos mineralógicos. Se realizó un recorrido de campo en la localidad y sus alrededores, a fin de ubicar el problema ambiental y afinar la metodología de investigación. En el recorrido se identificaron, además, actores e informantes clave.

Investigación socioambiental

Para la fase social se empleó la metodología de investigación-acción (Ander-Egg, 1990) y se aplicaron los siguientes instrumentos:

Observación participante. Durante la primera fase de acercamiento, registrando y elaborando un diagnóstico preliminar y la identificación de los líderes oficiales, naturales, problemas y recursos de la comunidad.

Entrevista semiestructurada. Con el propósito de plantear la investigación social y de calidad de agua que se realizaría en la comunidad con su apoyo y autorización.

Entrevista abierta. A fin de establecer la percepción del propietario de la mina, así como obtener información de la historia reciente de la mina e información técnica no publicada.

Encuesta. El universo de la investigación fue de 164 viviendas ocupadas; partiendo de un nivel de confianza del 80% y un error del 0.76, se obtuvo un tamaño de la muestra de 51 viviendas. La encuesta se conformó con preguntas cerradas y abiertas, para obtener información de las siguientes variables:

- Demográficos: edad, género, estado civil, escolaridad y actividades económicas.
- Infraestructura y equipamiento: vivienda y servicios públicos.
- Salud: morbilidad infantil y adulta.
- Ambiental: agua y suelo.

El propósito en esta fase de la investigación fue abordar la relación de los habitantes de

San José de Avino con su entorno natural desde varios puntos de vista, generando los indicadores que de forma sistemática la describan.

Análisis químicos

La toma de muestras de agua y de suelo se llevó a cabo en dos etapas: una que correspondió a la etapa de exploración (7 de marzo de 2011) y otra a un muestreo dirigido (3 de septiembre 2011). Para el muestreo exploratorio se seleccionaron tres puntos en la localidad de Pánuco de Coronado, ubicado al norte del aprovechamiento minero, y tres puntos en el poblado de San José de Avino, ubicado al sur del aprovechamiento minero, siguiendo un criterio de acuerdo con su posición geográfica de manera que permitiera cubrir la mayor superficie posible y descartar una influencia extensiva de la problemática de contaminación. Las muestras se tomaron siempre por duplicado. Durante la toma de muestras se midieron en campo parámetros tales como potencial hidrógeno (pH), temperatura T ($^{\circ}\text{C}$), conductividad eléctrica CE (mS/cm). La ubicación del muestreo exploratorio se detalla en el cuadro 1.

Por su parte, el muestreo dirigido fue diseñado a partir de los resultados del primero, combinado con los resultados de las entrevistas iniciales, seleccionando para ello nueve sitios, entre los que se incluyeron seis norias dentro de la localidad, dos puntos de la represa que utilizada como abrevadero recibe los escurrimientos aguas abajo y uno en la galería filtrante que abastece de agua hoy día a la localidad, ubicada aproximadamente a 1 km al este (cuadro 2).

En el laboratorio, las muestras de agua se analizaron para determinar la concentración de arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb), cobre (Cu), manganeso (Mn), hierro (Fe), níquel (Ni) y zinc (Zn).

Además se realizó la toma de dos muestras de suelo contaminado con sedimentos en las coordenadas N 24° 31.045' W 104° 18.052' y 2

Cuadro 1. Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo exploratorio de agua.

Muestra	Sitio	Coordenadas
M1	Plaza Pánuco de Coronado	N 24° 32.3' W 104° 19.6'
M2	Pozo principal Pánuco de Coronado	N 24° 3.2' W 104° 19.3'
M3	Escuela secundaria de Pánuco de Coronado	N 24° 32.2' W 104° 19.3'
M4	Represa el Avino	N 24° 30.8' W 104° 18.1'
M5	Pozo el Avino	N 24° 30.8' W 104° 17.9'
M6	Casa el Avino	

Cuadro 2. Coordenadas de puntos de muestreo de agua dirigido.

Muestra	Sitio	Coordenadas
M1	Represa Avino superficial	N 24° 30' 52.1" W 104° 18' 6.5"
M2	Pozo conocido como Noria	N 24° 31' 27.7" W 104° 17' 47.5"
M3	Noria Francisco Betancourt	N 24° 31' 27.7" W 104° 17' 49.9"
M4	Noria Sra. Bertha	N 24° 31' 26.1" W 104° 17' 54.2"
M5	Pozo de la plaza	N 24° 31' 27.7" W 104° 17' 55.1"
M6	Noria Sra. Manuela	N 24° 31' 22.7" W 104° 17' 59.6"
M7	Pozo entrada	N 24° 31' 21.3" W 104° 17' 57.7"
M8	Pozo del Tajo	N 24° 30' 3.6" W 104° 18' 12.2"
M9	Represa Avino Profundidad	N 24° 30' 51.7" W 104° 18' 8.7"

140 msnm en la microcuenca del arroyo que presenta las evidencias de contaminación aguas arriba de la represa, las cuales se analizaron para la determinación de la concentración de cadmio (Cd), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn).

Preparación de las muestras

Previo análisis de las muestras de agua y suelo, se sometieron a una digestión para la oxidación de la materia orgánica y la disolución de los analitos, con el fin de evitar interferencias de

matriz; la preparación se realizó de acuerdo con la NMX-AA-051-SCFI-2001 (DOF, 2001). A continuación se describe de manera breve el proceso:

Digestión de las muestras de agua para la determinación de metales totales

1. Se realizaron digestiones por duplicado y un blanco para corroborar los resultados.
2. Se adicionaron 3 ml de ácido nítrico y se calentaron hasta llegar a un volumen de 2 a 5 ml.

3. Se adicionaron 5 ml de ácido nítrico al producto y se calentaron de nuevo, cubriendo el recipiente con un vidrio de reloj.
4. Se adicionaron 10 ml de ácido clorhídrico 1:1 y 15 ml de agua bidestilada.
5. Se calentaron por 15 minutos y luego se lavaron, filtraron y aforaron a 100 ml.

Ya que a lo largo de la digestión se producen vapores, para mayor seguridad, éstas se llevaron a cabo en la campana de extracción.

Digestión de las muestras de suelo

1. El suelo se dejó secar a temperatura ambiente durante 24 horas.
2. Se trituró y tamizó con una malla #10.
3. Se pesaron 0.15 g de muestra por duplicado y se depositaron en vaso de precipitados.
4. Se adicionaron 5 ml de HNO₃ grado reactivo y 10 ml de HCl grado reactivo; se cubrieron y calentaron en parrilla eléctrica para evaporar hasta tener aproximadamente 2 ml de líquido.
5. Se repitió el paso anterior.
6. Se añadieron 5 ml de HCl (1:1) y 7.5 ml de agua bidestilada; se calentó por 10 minutos.
7. Se filtraron y llevaron a aforo a 100 ml.

Caracterización de las muestras

Se determinó la concentración de arsénico (As) y metales pesados: hierro (Fe), manganeso

(Mn), cobre (Cu), plomo (Pb), zinc (Zn), cadmio (Cd), cromo (Cr) y calcio (Ca) por absorción atómica.

El análisis de las muestras se realizó en la Central de Instrumentación del CIIDIR-IPN Unidad Durango. Se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica (EAA) marca PerkinElmer modelo AAnalyst 700.

Análisis en el EAA

Se usó la técnica de horno de grafito para leer As, Cd, Cr, y Ni en las muestras de agua; los demás elementos se analizaron por flama. Asimismo, todos los metales analizados en las muestras de suelo se analizaron por flama.

Se utilizaron lámparas de cátodo hueco. Se calibró el equipo mediante estándares de calibración preparados a partir de disoluciones patrón certificadas para cada elemento, así como material volumétrico clase A (cuadro 3).

Para comprobar la confiabilidad del análisis se prepararon estándares de control de calidad, los cuales consisten en disoluciones de concentración conocida, preparadas a partir de la disolución patrón certificada.

El estándar de control de calidad se analizó después de la calibración y al finalizar el análisis de las muestras. La NXM-052-AA-SCFI-2002 recomienda que el porcentaje de recuperación del estándar de control de calidad no exceda el 15%.

Cuadro 3. Estándares de calibración.

Elemento	Concentración de la curva de calibración	Marca de la disolución patrón certificada
As	5, 10, 20, 30, 40 µg/l	Hycel
Cd	2, 4, 8 µg/l	Cenam
Cr	5, 10, 20, 30 µg/l	Cenam
Pb	5, 10, 20, 30 mg/l	Cenam
Ni	5, 10, 20, 30 µg/l	PerkinElmer
Cu	1, 2, 4, 10 mg/l	PerkinElmer
Fe	1, 5, 10, 20 mg/l	PerkinElmer
Mn	1, 2, 4, 8 mg/l	PerkinElmer
Zn	2, 4, 6 mg/l	PerkinElmer

Transecto geo hidrológico

Se obtuvieron las elevaciones de los brocales de las norias, del espejo del agua y del fondo, a fin de compararlas con los datos de la elevación de inundación de la mina, generando un perfil de elevaciones integrado con el perfil geológico de las perforaciones exploratorias en la zona; con ello se buscó verificar o descartar la relación del nivel del agua en la mina con los niveles de las norias artesianas, como es la creencia de las personas de la localidad.

Análisis de la normatividad relacionada con los residuos mineros

Se revisó la política pública relacionada con los residuos mineros manifestada en la legislación y normatividad relacionada, en particular las siguientes:

1. Ley Minera y su reglamento.
2. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (artículos 28 y 35).
3. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Peligrosos (artículo 17).
4. Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Peligrosos (artículos 33 y 34).
5. Normas oficiales mexicanas:
 - a) NOM-052-SEMARNAT-2005.
 - b) NOM-120-SEMARNAT-1997.
 - c) NOM-141-SEMARNAT-2003.
 - d) NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.
 - e) NOM-155-SEMARNAT-2007.

Discusión y resultados

Perfil socioambiental

Ubicación

La localidad de San José de Avino, localizada en el municipio de Pánuco de Coronado del estado de Durango, México, se ubica a 2 160 msnm, a los 24° 31' latitud norte y 104° 18'

latitud oeste (INEGI, 2005). El ejido tiene una superficie de 4 670.525 hectáreas y cuenta con dos asentamientos humanos: el poblado que ocupa 68.79 hectáreas y la mina (INEGI, 2000).

Estructura demográfica

En 2010, San José de Avino contaba con una población total de 760 habitantes, de cuales 386 eran hombres y 374 mujeres. Además de un total de 209 viviendas de las que 164 estaban habitadas. De estas 164 viviendas, 17 tenían piso de tierra y 6 consistían de una sola habitación; 108 de todas las viviendas tenían instalaciones sanitarias, 155 estaban conectadas al servicio público y 162 tenían acceso a la luz eléctrica (INEGI, 2010).

Los datos del censo 2010 del INEGI muestran que la mayor parte de la población de la localidad es adulta, ya que el 65% de los habitantes tiene 18 años y más. La población infantil y joven no constituye el basamento de la pirámide poblacional, lo que manifiesta un envejecimiento a mediano plazo (figura 1).

La población ha ido decreciendo debido a la migración fuera de la localidad, con lo que de 1990 a 2005 se redujo en un 33%, con una pequeña recuperación hacia el 2010 de acuerdo con el censo, para cerrar en un 21.7% (figura 2).

Escolaridad

En cuanto a escolaridad, de acuerdo con la encuesta, la comunidad tiene un nivel de estudios por debajo del básico (preescolar-preparatoria), ya que un 61% cursó primaria, el 37% tiene secundaria y sólo el 2% cuenta con preparatoria. En la comunidad existen planteles que imparten educación pública preescolar, primaria y telesecundaria.

Vivienda

El desarrollo urbano de la localidad ha sido concéntrico. A partir del centro histórico, las viviendas ubicadas en el centro de la comunidad son antiguas, con estilos arquitectónicos

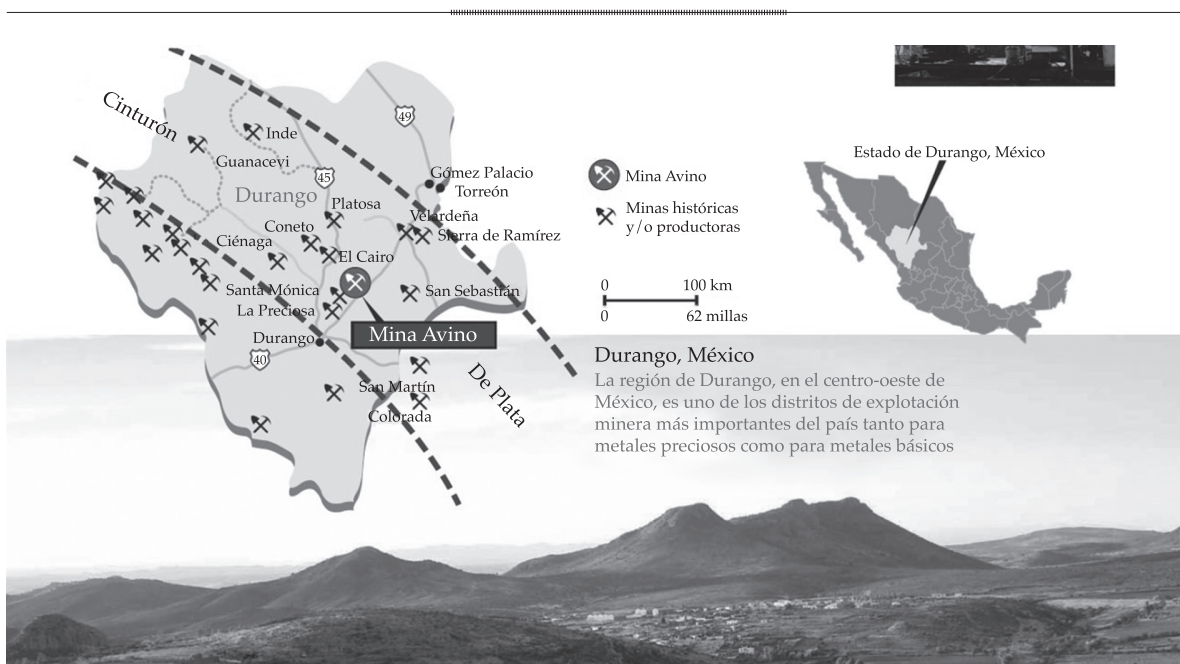


Figura 1. Ubicación de la mina de San José de Avino (tomado de www.avino.com *Avino Fact Sheet Spanish*, marzo 2010).

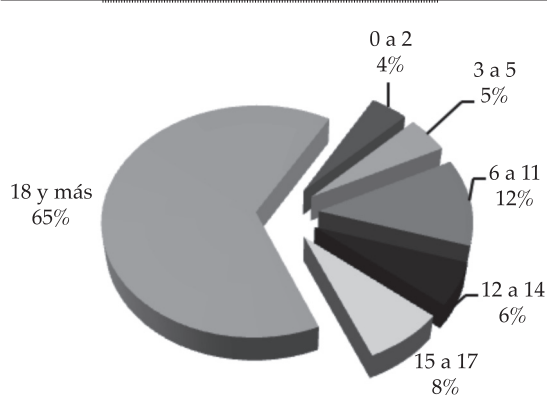


Figura 2. Distribución de la población por edades (INEGI, 2010).

coincidentes con una traza colonial y las viviendas de los extremos del poblado son de reciente edificación.

En cuanto a la propiedad de la vivienda, la mayor parte de la población (86%) habita en casa propia, el 12% vive en una casa prestada y el 2% lo hace en una casa rentada (figura 3); asimismo, el 67% tiene más de 15 años de vivir en su casa; en contraste con el 24% que tiene

menos de cinco años de vivir en su casa (figura 4).

La mayor parte de las casas pertenecientes a las personas encuestadas posee paredes de adobe (84%), el techo de los hogares es de lámina (68%) y el piso de las casas es de concreto casi en su totalidad.

Servicios públicos e infraestructura

En relación con los servicios públicos, el cuestionario aplicado dio como resultado que la mayor parte de la población posee todos los servicios, como conexión con la red de agua potable, electricidad, drenaje y recolecta de basura (cuadro 4).

En la comunidad San José de Avino se conservan las norias que antiguamente fueron la fuente principal de abastecimiento de los hogares. San José de Avino se abastece de dos fuentes: la primera pertenece al mismo ejido y proviene del pozo denominado "El Tajo", localizado a 2.5 km, y la segunda fuente proviene del pozo de la localidad de Zaragoza, que se ubica a 5.7 km. Esta condición genera

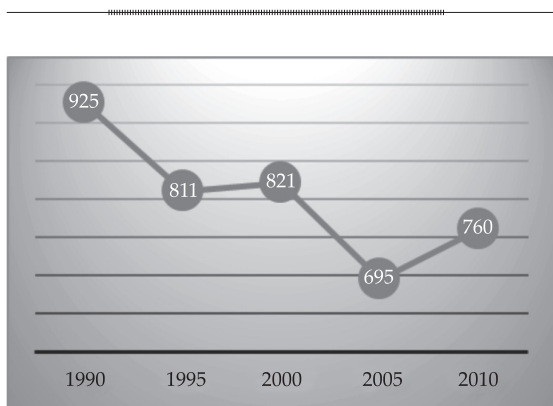


Figura 3. Crecimiento poblacional de San José de Avino (INEGI, 1990, 1995, 2005, 2010).

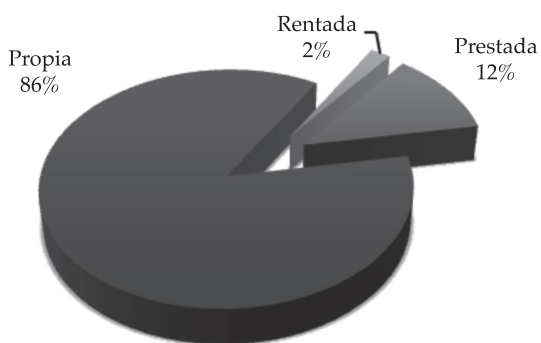


Figura 4. Régimen de tenencia de la casa.

que la disponibilidad y acceso al agua no sea suficiente por el bombeo y conducción del agua, además de que la red de distribución de la comunidad está sectorizada, lo cual obliga a administrar por tandeos.

Salud

Al no haber instituciones del sector salud en la comunidad de San José de Avino se consideró este indicador como primer acercamiento al tema de la salud en el área de estudio. Cabe señalar que si bien la encuesta no refleja casos de enfermedades asociadas con la presencia de metales pesados, éste puede ser un punto a investigar más delante de forma exhaustiva.

Cuando las personas se enferman se atienden en comunidades cercanas, principalmente en las localidades de Zaragoza, Madero y Pánuco de Coronado, lo que manifiesta carencia de infraestructura de atención médica en la comunidad, esto debido tal vez a que la comunidad es pequeña, en tamaño de población, y las inversiones en infraestructura las hacen en comunidades mayores.

Actividades económicas

El asentamiento de la comunidad fue a partir de la explotación del yacimiento minero; alrededor de ella se desarrolló la serie principal de actividades realizadas por la población, como ganadería, agricultura y minería (figura 5).

Percepciones de la comunidad

La percepción de la comunidad encuestada respecto al suelo es que se encuentra erosionado. Esto se entiende, dado que el poblado se ubica a las faldas de una formación montañosa; el principal problema que la población encuestada manifestó en relación

Cuadro 4. Cobertura de servicios.

Servicio	Datos censo INEGI 2010	Datos encuesta
Agua entubada	95%	98%
Drenaje	74%	72.6%
Electricidad	98.8%	94%
Colecta de basura	ND	94%

ND = no disponible.

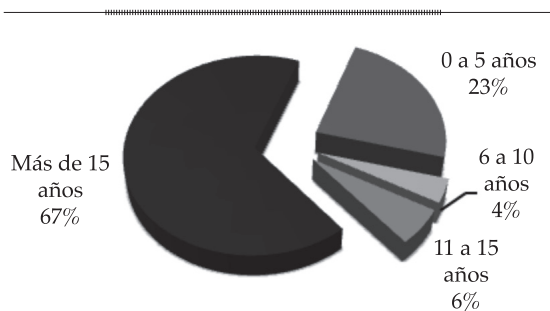


Figura 5. Tiempo de residencia.

con la calidad de ríos o arroyos fue que sus ríos y arroyos están contaminados (figura 6).

Aun así, la actividad principal realizada dentro de dichos ríos y arroyos es el aseo y abrevado del ganado vacuno. De la misma manera, de las orillas de los ríos y arroyos se extrae tanto arena como grava, que se utilizan para la fabricación del material que conforma las paredes de sus hogares. Como resultado relevante de la investigación en la parte social, sobresale la percepción de la calidad del agua por parte de los pobladores de San José de

Avino como parte de la problemática principal, junto con la falta de empleo, esto expresado de la siguiente manera.

Percepciones del propietario de la mina

El mineral de San José de Avino se explota desde la Colonia. Ha sido administrado por españoles, ingleses, mexicanos y actualmente por una sociedad de capital canadiense y mexicano en menor proporción. Su producción ha sido cobre, plata y oro.

En entrevista semiestructurada, el licenciado Isita, antiguo dueño de la mina, declaró que: "En 1968 inician con la fase de exploración. En 1974, el establecimiento de la mina, con una capacidad instalada de mil toneladas diarias, de las que sólo cubrían 40 toneladas/diarias de la mina a tajo abierto extraían oro y plata. De 1990 al 1992 seguían extrayendo oro y plata en menor cantidad; en cambio, había mayor cantidad de cobre en el fondo del tajo. En 1992 inician la exploración de la mina subterránea; para 1994 comienza la explotación de la mina subterránea con extracción de

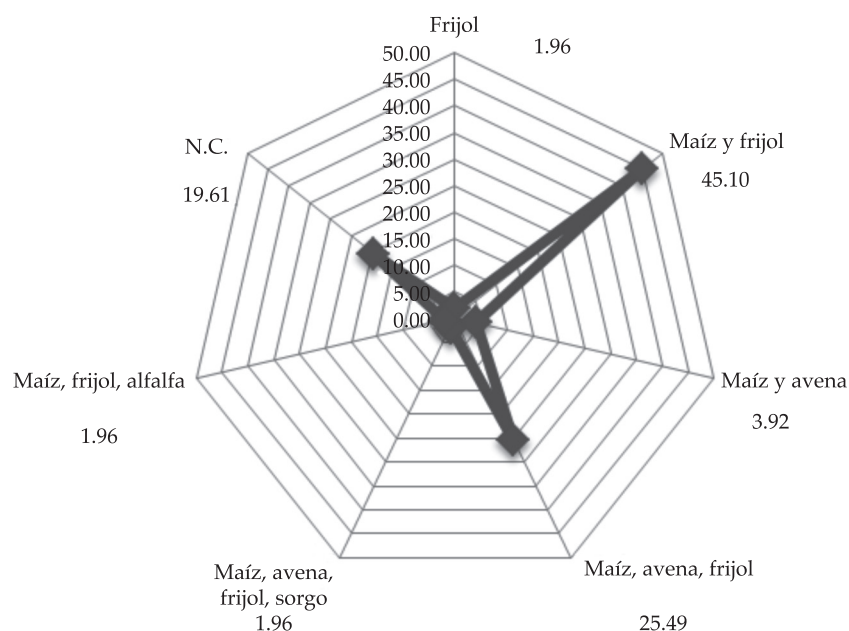


Figura 6. Diversificación de cultivos en porcentaje.

cobre, oro y plata". Considera que la mina es productiva e indispensable para la vida de la localidad "ya que tiene explotándose más de cuatrocientos años; es abundante, pero pobre en calidad, también llamada "carguera", ya que la recuperación es del 60% y explicó que de plata obtenían 250 g/t mientras que de oro 1.5 g/t (...). La presencia de la mina fue benéfica para la región, ya que por la actividad minera y al no haber electricidad y agua en la zona, buscó el establecimiento del servicio para la mina y, por ende, para la comunidad de San José de Avino, así como la construcción de una represa El Caracol y la perforación del pozo "El Barranqueño" cerca de la represa de 400 m de profundidad. Además de ofrecer trabajo, con lo que disminuyó la migración, porque la minería ofrece buenos sueldos y contribuye con los impuestos a capitalizar obras". Asimismo señaló que la vida útil de la mina es de más de cien años. Con ello establece una posición de constante beneficio a la localidad y se ha deslindado de manera recurrente de cualquier implicación respecto a la contaminación, al asegurar que de manera recurrente se ha hecho un "Señalamiento de muertes de ganado,

que nunca se comprobaron. En una ocasión se le hizo necropsia a una vaca sin resultados atribuibles a la contaminación". Y que incluso "En el año 2004 se le informó que se había reventado la presa de jales porque había un vertido en las inmediaciones del poblado, y con la presencia de autoridades de Conagua y Profepa se ubicó el punto de origen del vertido en una noria", identificada como la noria de la casa de doña Manuelita, que corresponde al punto de muestreo M6.

Hidrografía superficial

La localidad se emplaza en la Región Hidrológica Administrativa III y pertenece a la Región Hidrológica 11 de la Subcuenca del Río Durango, en el nacimiento del río Las Casas. Al interior del ejido corren pequeños arroyos intermitentes que desembocan en una represa ubicada en el acceso al poblado (figura 8).

Resultados de análisis de laboratorio

Para medir la calidad del agua del acuífero que abastece a la población se tomaron muestras

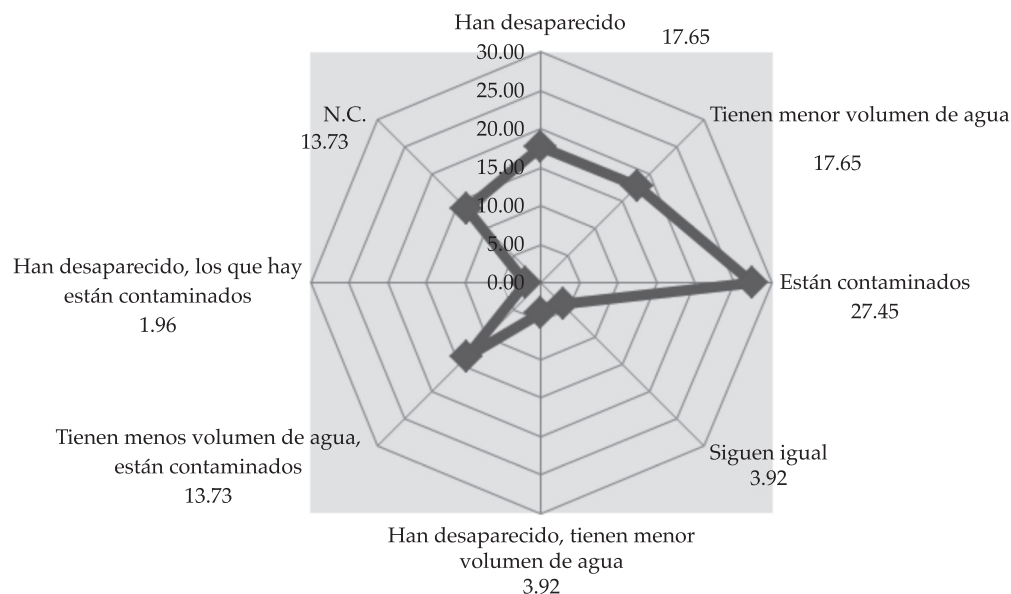


Figura 7. Percepción acerca de la calidad de agua de ríos y arroyos.

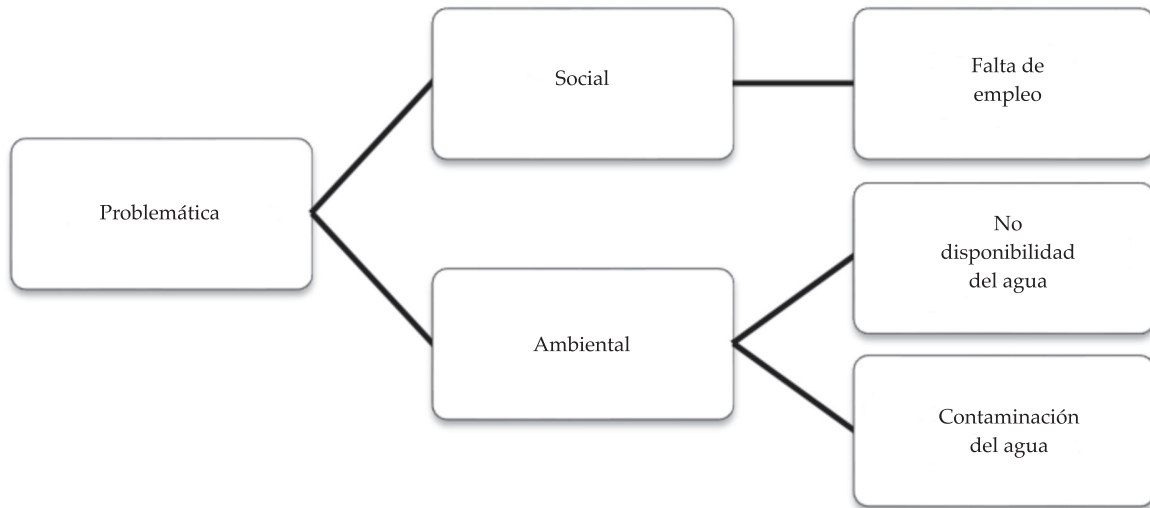


Figura 8. Percepción de la problemática en San José de Avino.

en nueve sitios, cuidando que estas muestras fueran representativas del agua proveniente de las norias. Se realizaron dos muestreos: un muestreo sondeo y un muestreo dirigido. Además, se incluyó un sitio de agua superficial, ubicándose en la represa El Tajo, utilizada como abrevadero.

Parámetros de campo

Los parámetros de campo que se analizaron fueron pH, T (°C), CE (mS/cm). En los cuadros 5 y 6 se presentan los resultados de tales parámetros de los muestreos realizados. En el primer muestreo se consideraron seis sitios,

Cuadro 5. Resultados del muestreo exploratorio de agua.

Muestra	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mS)
M1	7.2	24	0.59
M2	7.2	24	0.59
M3	7.3	24	0.59
M4	8.4	24	1.34
M5	7.9	23	2.45
M6	8.2	24	0.68

Cuadro 6. Resultados del muestreo dirigido de agua.

Muestra	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (mS)
M1	6.6	21	0.64
M2	7.0	23	1.086
M3	7.0	19	2.10
M4	7.18	20	0.969
M5	7.33	21	4.5
M6	5.79	20	1.992
M7	7.61	19	1.995
M8	7.27	21	0.738
M9	7.4	22	0.61

puesto que se trataba de ver el comportamiento del acuífero; en el segundo muestreo se tomaron nueve sitios de los cuales solamente dos correspondían a la primera etapa de muestreo. Esta modificación de los sitios se debió al análisis de los datos recabados en las encuestas.

Parámetros de laboratorio

En el laboratorio se determinaron las concentraciones de arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb), cobre (Cu), manganeso (Mn), hierro (Fe), níquel (Ni) y zinc (Zn). En los cuadros 5 y 6 se muestran los resultados de las concentraciones de estos elementos.

De los resultados obtenidos en el muestreo dirigido destacan las muestras M1, M6 y M9, donde los metales Cd, Pb, Ni, Mn, Fe y Cu se encontraron por arriba de los límites máximos permisibles, establecidos en la NOM-127-SSA1-1994, y hasta 947 veces en el caso de Pb (cuadro 7).

De los resultados obtenidos en el muestreo dirigido destacan las muestras M1, M6 y

M9, donde los metales Cd, Pb, Ni, Mn, Fe y Cu tienden a tener presencias mayores correlacionadas entre sí (figura 9).

Muestreos de suelo

Se tomaron dos muestras de suelo en el sitio con coordenadas N 24° 31.045', W 104° 18.052' y 2 140 msnm. En el cuadro 8 se presentan los resultados obtenidos. Visualmente se pudo apreciar que la contaminación provenía de la sedimentación de los arrastres del agua proveniente de los jales mineros, así como del agua vertida por la noria.

En estos resultados destaca la presencia de cobre, que como se puede observar en el cuadro 6, supera en una magnitud mayor al 300% la concentración recomendada para que no exista impacto negativo en el suelo por este tipo de actividad (Bowie & Thornton, 1985).

Perfil geohidrológico

Interpretando los resultados del perfil geohidrológico, el nivel de la inundación de la

Cuadro 7. Resultados de muestreo de agua dirigido (septiembre 2011).

Muestra	As	Cd	Cr	Pb	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
LMP	0.025	0.005	0.050	0.01	2.00	0.30	0.15	0.050	5.00
M1	< 0.005	0.007 ± 0.000	< 0.010	1.74 ± 0.083	< 1.00	2.246 ± 0.093	3.200 ± 0.011	0.008 ± 0.002	1.571 ± 0.075
M2	< 0.005	< 0.002	< 0.010	< 0.03	< 1.00	< 0.200	< 0.06	< 0.005	0.438 ± 0.029
M3	< 0.005	0.003 ± 0.001	< 0.010	< 0.03	< 1.00	0.597 ± 0.020	0.069 ± 0.047	< 0.005	0.392 ± 0.016
M4	0.008 ± 0.001	< 0.002	< 0.010	0.127 ± 0.035	< 1.00	0.343 ± 0.177	0.069 ± 0.029	< 0.005	0.323 ± 0.005
M5	< 0.005	< 0.002	< 0.010	0.152 ± 0.000	< 1.00	< 0.200	1.245 ± 0.811	< 0.005	0.130 ± 0.000
M6	0.010 ± 0.002	1.859 ± 0.000	< 0.010	0.516 ± 0.021	13.791 ± 0.357	0.969 ± 0.044	2.294 ± 0.022	0.176 ± 0.001	3.906 ± 0.003
M7	0.006 ± 0.001	0.004 ± 0.000	< 0.010	0.065 ± 0.029	< 1.00	0.242 ± 0.039	0.212 ± 0.026	< 0.005	0.548 ± 0.036
M8	0.012 ± 0.000	< 0.002	< 0.010	< 0.03	< 1.00	0.242 ± 0.028	< 0.06	< 0.005	0.293 ± 0.017
M9	0.010 ± 0.001	0.125 ± 0.017	0.012 ± 0.005	9.47 ± 0.170	4.895 ± 0.07	21.711 ± 0.089	8.207 ± 0.664	0.023 ± 0.000	3.361 ± 0.018

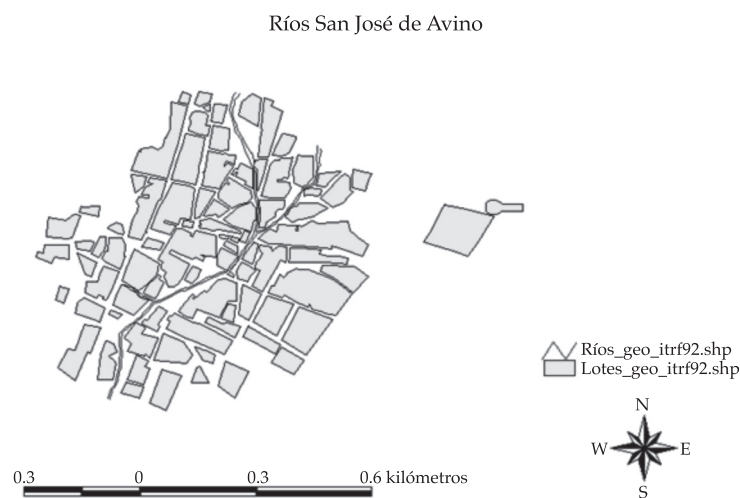


Figura 9. Arroyos intermitentes que cruzan el poblado.

Cuadro 8. Resultados del análisis de muestras de suelo.

Concentración en mg/g							
Muestra	Cd	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
B & T	< 0.001 - 0.002	< 2	--	--	0.002 - 0.1	0.01 - 0.15	0.025 - 0.2
A	0.082 ± 0.001	270 ± 8.48	43 ± 2.35	1.43 ± 0.27	0.029 ± 0.002	3.14 ± 0.46	21.51 ± 0.32
B	< 0.001	8.1 ± 0.61	73.33 ± 0.004	3.03 ± 0.44	0.01 ± 0.002	7.36 ± 0.23	2.15 ± 0.15

mina, identificado como nivel 14 tanto por el dueño de la mina como por los empleados, está varias decenas de metros por debajo del nivel de saturación en el suelo medido en las norias muestreadas; por lo tanto, no existen conexiones evidentes de los flujos subálveos que permitan suponer una influencia del nivel de inundación de la mina a los estratos aportadores de agua en las norias, por lo que su origen debe suponerse superficial, descartando así la percepción de las personas de una influencia desde el interior de la mina.

Conclusiones

Dado que en la producción minera se involucra el movimiento de grandes volúmenes de material mediante excavaciones exploratorias para la construcción de las diversas galerías que permiten el acceso tanto horizontal como vertical hasta llegar a la zona de explotación

minera en sí, el proceso genera una cantidad importante de material “inerte” para los fines de la industria minera.

En el caso de San José de Avino, se localizan al menos tres grupos de terreros (figura 10) ubicados aguas arriba del poblado muy cerca del cauce, compuestos de material no útil a la minería, pero sí integrados de roca fracturada con partículas menores a los 60 cm de diámetro y con una gran diversidad de tamaño; el alto contenido natural de óxido de cobre le proporciona una coloración verde. Al pie de cada uno de estos terreros se localizaron zonas de concentración de óxido de cobre originados por la lixiviación del agua de lluvia y su posterior evaporación superficial. Justo en el punto de nacimiento del arroyo, al pie de uno de los terreros, se localizó una cárcava con evidentes signos de lixiviados depositados desde la humedad subálvea a una profundidad de 30 a 35 cm (figuras 10, 11, 12 y 13, 14 y 15).

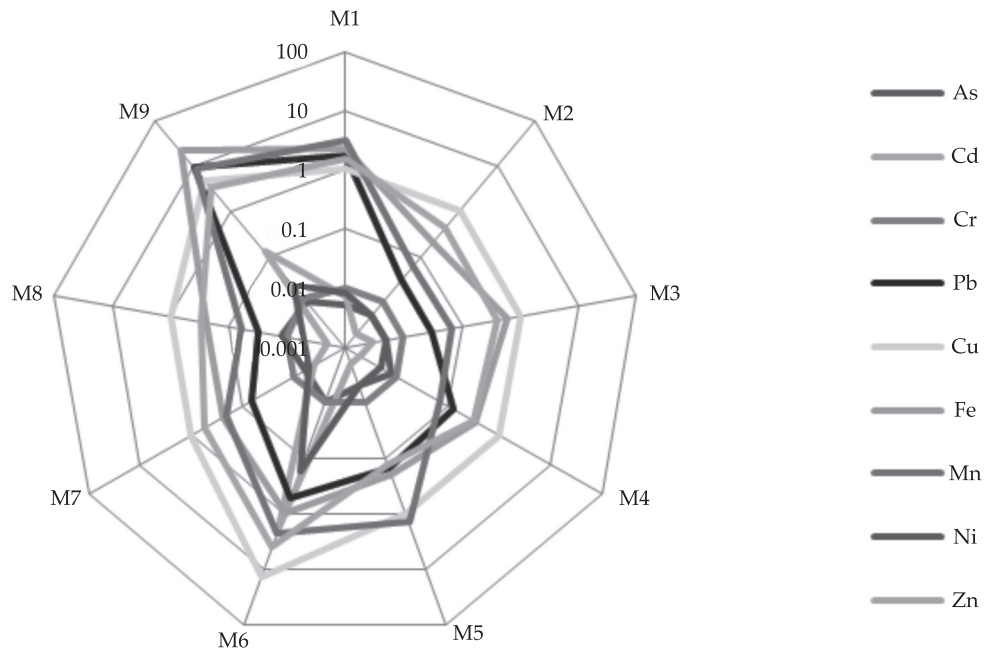


Figura 10. Diagrama de concentración de metales pesados en las muestras de campo.

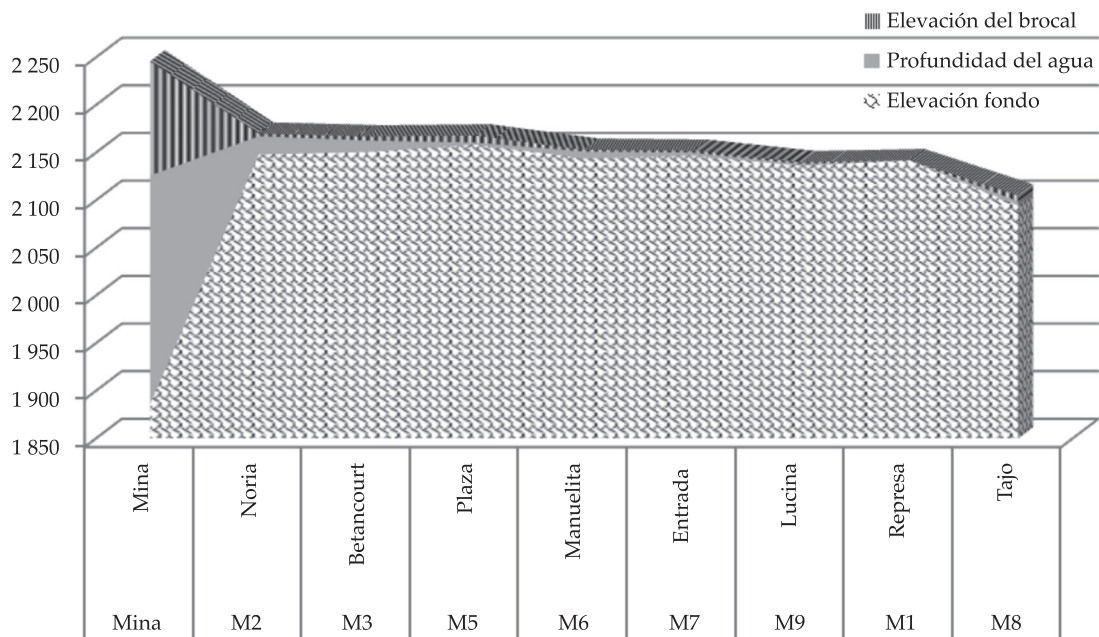


Figura 11. Perfil geohidrológico.

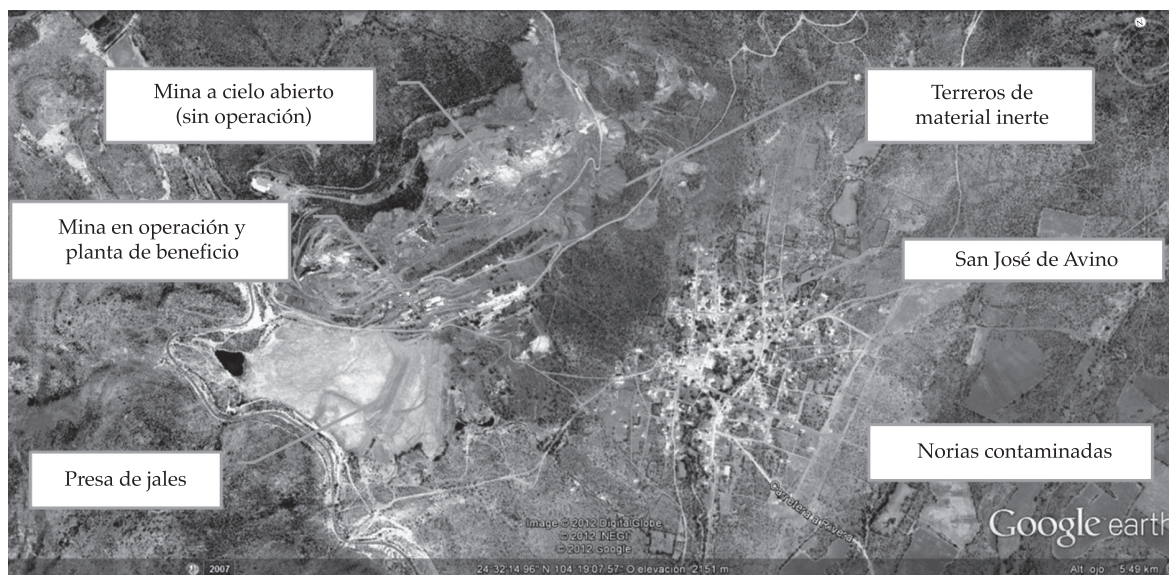


Figura 12. Mapa general de la zona de San José de Avino.



Figura 13. Aspecto del arroyo aguas abajo de las norias productoras de agua con alto contenido de óxido de cobre.



Figura 14. Imagen de los terreros y las evidencias de lixiviado en la parte baja.

Todo esto se localiza aguas arriba del poblado, a una distancia de 500 metros de la primera casa habitación y sobre la cabeza del nacimiento del arroyo, así como en la margen derecha.

La normatividad NOM-052-SEMARNAT-2005, NOM-120-SEMARNAT-1997, NOM-141-SEMARNAT-2003, NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 y NOM-155-SEMARNAT-2007 no contempla en ningún caso restricción alguna para los terreros, ni obliga al industrial minero

a clasificarlos ni a evaluar su posible activación al exponerse a los elementos.

La manifestación de impacto ambiental de estos proyectos mineros no considera este tipo de extracciones de material inerte como riesgoso y no establece medidas de evaluación ni de recuperación de los eventuales lixiviados. Sólo se contemplan los sitios de tiro de material que requieren, sin embargo, el visto bueno de la Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente.



Figura 15. Aspecto de la lixiviación en una cárcava aguas arriba de San José de Avino.

Aunque la contaminación en San José de Avino es ocasionada por la actividad minera, no corresponde a una falta de observancia a la normatividad vigente, sino a un vacío en ella.

Por tanto, es necesario establecer en las normas oficiales mexicanas o bien en los criterios de revisión de las manifestaciones de impacto ambiental, la caracterización y evaluación de los contenidos de metales pesados y algunos otros contaminantes del material de los terreros y la consecuente construcción de sistemas de recuperación de lixiviados, además de la restricción de colocarse aguas arriba de fuentes de abastecimiento para consumo humano, entre otras acciones pertinentes.

Recomendaciones y sugerencias

Las recomendaciones derivadas del presente estudio se orientan en tres sentidos. El primero es el social: es conveniente propiciar un acercamiento entre la comunidad y la empresa, exponer con claridad la problemática y establecer soluciones conjuntas, como la construcción de trampas de lixiviados y convenir algún proceso de tratamiento y disposición final de los sedimentos.

El segundo aspecto es la búsqueda de efectos en el ganado que abreva en la presa El Tajo, receptora de los escurrimientos con altas cargas de metales pesados.

Por último, es necesario estudiar sitios similares, buscando identificar lixivitaciones de

metales pesados y otros compuestos en terreros mineros que tal vez no sean tan evidentes como este caso, pero que se estén presentando, para eventualmente iniciar con las consultas necesarias, a fin de emitir normatividad que lleve a la caracterización obligatoria de los riesgos de lixiviación de metales pesados en terreros de minería.

Referencias

- Ander-Egg, E. (1990). *Repensando la Investigación Acción Participativa*. Buenos Aires: Grupo Editorial Lumen Humanitas.
- Bowie, S. H. U., & Thornton, L. (1985). *Environmental Geochemistry and Health*. Hingham, USA: Kluwer Academic Publ.
- Diario Oficial de la Federación. Normas Oficiales Mexicanas (NOM-052-SEMARNAT-2005 NOM-120-SEMARNAT-1997, NOM-141-SEMARNAT-2003, NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, NOM-155-SEMARNAT-2007).
- INEGI (2010). *Censos de Población y Vivienda*. Consultado en diciembre de 2011. Recuperado de <http://www.censo2010.org.mx>.
- Ley Minera y su reglamento, <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lmin.htm>.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lgepa.htm>.
- Ley General para la Prevención y Gestión integral de los Residuos Peligrosos, <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/index/htmre>.
- Reglamento de la Ley General para la Prevención y Gestión integral de los Residuos Peligrosos, <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/index>.

Dirección institucional de los autores

M.C. María de Lourdes Corral Bermúdez

Egresada de la Maestría en Gestión Ambiental
Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Unidad Durango
Sigma 119, Fraccionamiento 20 de Noviembre II
Durango, Durango, MÉXICO
Teléfono: +52 (618) 814 2091
freelucobel@hotmail.com

Dr. Eduardo Sánchez Ortiz

Investigador del Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR
Unidad Durango
Calle Sigma 119, Fraccionamiento 20 de Noviembre II
34220, Durango, Durango, MÉXICO
Teléfono: +52 (618) 8142 091, extensión 82622
esanchezo@ipn.mx



Haga clic aquí para escribir al autor

Diseño óptimo de la red de monitoreo del acuífero “Saltillo-Ramos Arizpe” para el adecuado manejo del recurso hídrico, aplicando un enfoque geoestadístico

• Martín A. Díaz-Viera •
Instituto Mexicano del Petróleo

• Félix Canul-Pech* •
Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México

*Autor de correspondencia

Resumen

Díaz-Viera, M. A., & Canul-Pech, F. (septiembre-octubre, 2014). Diseño óptimo de la red de monitoreo del acuífero “Saltillo-Ramos Arizpe” para el adecuado manejo del recurso hídrico, aplicando un enfoque geoestadístico. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(5), 141-159.

El presente estudio tiene la finalidad de realizar el diseño óptimo de la red de monitoreo de los niveles piezométricos en el acuífero “Saltillo-Ramos Arizpe”, aplicando un enfoque geoestadístico. Para determinar los mejores pozos para el monitoreo se consideran dos alternativas: en la primera se fija un nivel de varianza del error de estimación, mientras que en la segunda se fija la cantidad de pozos, independientemente del error de estimación que resulte. En ambas opciones se aplica la técnica de optimización de las inclusiones sucesivas óptimas, en combinación con el método de kriging ordinario como estimador espacial. Los datos utilizados fueron tomados de 750 aprovechamientos hidráulicos (pozos y norias) de un estudio geohidrológico realizado en el acuífero en 2007. Los niveles piezométricos presentaron el fenómeno de tendencia espacial, es decir, falta de estacionaridad, la cual fue estimada por medio de un ajuste polinomial de primer grado y posteriormente restada a los datos originales, obteniéndose valores residuales. A dichos residuales se les calcularon semivariogramas y se les ajustó un modelo esférico e isotrópico. La red óptima consta de 144 pozos, determinada para una desviación estándar del error de estimación por kriging ordinario en bloques de 21 metros. Lo anterior representa un 19.2% de los 750 aprovechamientos hidráulicos existentes en el acuífero de estudio, lo cual implica un ahorro en un 80.8% de costo de monitoreo en pozos. Asimismo, se determinaron los mejores 50, 100, 200, 300, 400 y 500 pozos para el monitoreo, opciones que se pueden tomar en cuenta dependiendo de los recursos materiales, financieros y humanos disponibles para realizar dicha actividad.

Palabras clave: estimación, kriging, optimización, inclusiones sucesivas, geoestadística, acuífero, red de monitoreo, diseño óptimo de redes.

Abstract

Díaz-Viera, M. A., & Canul-Pech, F. (September-October, 2014). A Geostatistical Approach to the Optimal Design of the “Saltillo-Ramos Arizpe” Aquifer Monitoring Network for Proper Water Resources Management. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(5), 141-159.

The purpose of this study is to determine the optimal design of the piezometric level monitoring network in the “Saltillo-Ramos Arizpe” aquifer using a geostatistical approach. To identify the best wells for monitoring, two options were considered: one fixed the level of variance in the estimation error and the other fixed the number of wells regardless of the resulting estimation error. Both options applied the optimal successive inclusions technique in combination with the ordinary kriging method as a spatial estimator. The data used were taken from 750 hydraulic installations (wells and treadmills) in a geohydrological study conducted in the aquifer in 2007. Groundwater levels showed spatial trends —i.e., lack of stationarity— which was estimated by a first degree polynomial fit and then subtracted from the original data, thereby obtaining residuals. With these residuals, semivariograms were calculated and an isotropic spherical model was fitted. The resulting optimal network consists of 144 wells, with a standard deviation of error of 21 meters determined by ordinary block kriging. This represented 19.2% of the 750 existing hydraulic installations in the study aquifer, and implies a 80.8 % savings in the cost of monitoring the wells. The best 50, 100, 200, 300, 400 and 500 monitoring wells were also determined, and represent options which can be considered depending on the material, financial and human resources available for this activity.

Keywords: Estimation, kriging, optimization, successive inclusions, geostatistics, aquifer, monitoring network, optimal network design.

Recibido: 05/12/12
Aceptado: 15/03/14

Introducción

El estudio del recurso hídrico dulce disponible se justifica por la demanda de consumo que se tiene por parte de los seres vivos. Por lo tanto, es importante monitorear el comportamiento del agua subterránea, sobre todo en los acuíferos de alta demanda.

El área metropolitana de Saltillo constituye un área de estudio interesante para la aplicación de la metodología del presente trabajo. Según los resultados de los censos de población publicados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010), esta zona ha presentado un crecimiento urbano muy importante en los últimos años y la demanda de agua es abastecida principalmente por el acuífero "Saltillo-Ramos Arizpe", ya que no cuenta con otras fuentes importantes de agua dulce.

La metodología utilizada se basa en aprovechar que la varianza del error de estimación con kriging no depende del valor de la variable; lo anterior, según Samper y Carrera (1990). Por lo tanto, es posible calcular dicha varianza antes de realizar las medidas y obtener la localización de los puntos de medición, en este caso pozos, de forma que se minimice la incertidumbre de estimación. También se puede minimizar dicha incertidumbre dada una cantidad prefijada de pozos.

Algunos trabajos de referencia son: Prakash y Singh (2000), quienes realizaron un diseño de red óptima en la cuenca alta de Kongal, distrito de Nalgonda, A. P. (India), aplicando kriging; Banjevic y Switzer (2002) compararon estrategias de optimización de recocado simultáneo simulado y algoritmos de puntos de selección secuenciales; Dixon, Smyth y Chiswell (1999) aplicaron procedimientos de sistemas de información geográfica y algoritmos de recocado simulado; Lloyd y Atkinson (1999) realizaron diseños óptimos de configuración de muestreos utilizando kriging ordinario y kriging indicador; Cousens, Brown, Mcbratney, & Moerkerk (2002) aplicaron diferentes estrategias de muestreo para la

generación de mapas de malezas; Wang y Qi (1998) estudiaron el efecto de la distribución de muestras sobre el análisis de la estructura espacial de un suelo contaminado, entre otros.

El propósito de este estudio fue establecer y aplicar una metodología para determinar la red óptima de pozos para el monitoreo de los niveles piezométricos en el acuífero en cuestión con fines de manejo. Para conseguir lo anterior, se aplicó el enfoque geoestadístico: análisis preliminar y exploratorio de los datos, obtención de un modelo variográfico de la correlación espacial, estimación con kriging ordinario y optimización, aplicando la técnica de inclusiones sucesivas.

Objetivos

General

Establecer y aplicar a un caso de estudio una metodología que permita de manera sistemática obtener el diseño óptimo de redes de monitoreo con fines de manejo, a partir del análisis geoestadístico de los datos de niveles piezométricos.

Específicos

- Obtener un modelo de la variabilidad espacial de los datos de niveles piezométricos existentes mediante el análisis geoestadístico.
- Evaluar el comportamiento espacial de la varianza del error de estimación, aplicando kriging ordinario como método de estimación de los niveles piezométricos.
- Determinar la red óptima de pozos para el monitoreo de los niveles piezométricos en el acuífero "Saltillo-Ramos Arizpe" bajo diferentes escenarios.

Metodologías para el diseño óptimo de redes de monitoreo

Para el *diseño óptimo de redes de monitoreo de aguas subterráneas* se han propuesto, en diversas

partes del mundo, metodologías basadas en enfoques geoestadísticos o usando el "filtrado de Kalman". El primero permite evaluar el nivel de incertidumbre a través de la varianza del error de estimación en los puntos de una red, con base en la correlación espacial de una variable. El otro permite evaluar el grado de incertidumbre mediante el acoplamiento de un algoritmo de filtrado a un modelo de flujo hidrodinámico y ayuda a mejorar la exactitud de los resultados y la calibración del modelo. Se considera que ambos enfoques son equivalentes.

Para aplicar el enfoque geoestadístico se requiere de una función que describa la correlación espacial de la propiedad en estudio $Z(x)$. Usualmente puede utilizarse el semivariograma (Chiles & Delfiner, 1999; Olea, 1999; Isaaks & Srivastava, 1989; Moral-García, 2003).

El estimador más común del semivariograma o semivarianza según Omre (1984) se puede expresar como:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (1)$$

Donde N es el número de pares de $[Z(x+h) - Z(x)]$ separados a una distancia h . Cuando la función aleatoria es estacionaria, se cumple la relación:

$$\gamma(h) = \text{Var}(Z) - C(h) \quad (2)$$

Por lo tanto, en este caso se tiene definido tanto el semivariograma como la función de covarianza.

Normalmente, el semivariograma es una función monótona creciente, ya que al incrementarse la distancia h aumenta la diferencia $|Z(x+h) - Z(x)|$. Si Z es una función aleatoria estacionaria, γ alcanza un valor límite, denominado meseta o *sill*, equivalente a la varianza de Z ; la meseta se alcanza para un valor de h conocido como rango. El rango

determina la zona de influencia; fuera de ésta, la correlación espacial es nula. Por definición, $\gamma(0) = 0$, pero frecuentemente $\gamma(0)$ tiene valor positivo, denominado efecto pepita o nugget.

Sin embargo, no todos los semivariogramas alcanzan una meseta. Es posible que alguno no tienda asintóticamente a la varianza, sino que tienda a infinito cuando h tienda a infinito. Además, el rango no tiene que ser igual en todas las direcciones, reflejando en esa situación la existencia de anisotropía. También puede ser que para una dirección determinada haya más de un rango, lo cual indica la presencia de distintas estructuras de correlación actuando a diferentes escalas.

El sistema de kriging puntual ordinario (Isaaks & Srivastava, 1989) se puede escribir como:

$$\hat{Z}_0 = \sum_{i=1}^n W_i Z(x_i) \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n W_j \hat{C}_{ij} + \mu = \hat{C}_{i0} \quad \forall i = 1, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1$$

Donde $\hat{Z}_0$ es el estimador; W_i , los pesos para kriging puntual ordinario; μ , un multiplicador de Lagrange; $\hat{C}_{ij}$ y $\hat{C}_{i0}$, las covarianzas que para el caso de la hipótesis intrínseca, es decir, estacionaridad en segundo orden de la variable a estimar, se pueden sustituir por las semivarianzas.

La varianza del error minimizado se puede expresar como:

$$\hat{\sigma}_R^2 = \hat{\sigma}^2 - \left(\sum_{i=1}^n w_i \hat{C}_{i0} + \mu \right) \quad (4)$$

Esto minimiza la varianza del error de estimación que normalmente se conoce como la varianza kriging ordinario.

El estimador de kriging en bloques (Moral-García, 2003) tendrá la forma:

$$Z_{KB}^*(x) = \sum_{i=1}^n w_i Z(x_i) \quad (5)$$

Siendo w_i los pesos para kriging ordinario en bloques que se asigna a los datos $Z(x_i)$. Como en el caso del kriging puntual ordinario, el estimador para el bloque debe ser insesgado, tal que minimice el error de la varianza:

$$\sum_{j=1}^n w_j C(x_i - x_j) + \mu = \bar{C}(x_i - V(x)) \quad (6)$$

$$i = 1, \dots, n$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

El sistema es idéntico al puntual, salvo que el término de la derecha, $\bar{C}(x_i - V(x))$ se refiere a la covarianza entre el punto x_i y el bloque $V(x)$, o sea, la covarianza media entre la variable aleatoria $Z(x_i)$, y la variable aleatoria $Z(x)$, siendo ésta la correspondiente a todos los puntos del bloque V .

En la práctica, la covarianza $\bar{C}(x_i - V(x))$ se aproxima con la media aritmética de la covarianza entre los puntos muestra x_i y los m puntos obtenidos al discretizar el bloque V :

$$\bar{C}(x_i - V(x)) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m C(x_i - x'_j) \quad (7)$$

La varianza de kriging en bloques es:

$$\sigma_{KU}^2 = \bar{C}(V(x), V(x)) - \sum_{i=1}^n w_i \bar{C}(x_i, V(x)) - \mu \quad (8)$$

Donde la covarianza en el bloque $\bar{C}(V(x), V(x))$ se aproxima con la media aritmética de las covarianzas entre los puntos en los cuales se discretiza el bloque:

$$\bar{C}(V(x), V(x)) = \frac{1}{m^2} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \bar{C}(x'_j - x'_k) \quad (9)$$

Para el diseño óptimo de redes de monitoreo, utilizando el enfoque geoestadístico se aplican los siguientes métodos (Samper & Carrera, 1990):

Método del punto ficticio

Si se tiene un número n de mediciones correspondientes a n puntos $\{x_i, i = 1, \dots, n\}$ espacialmente distribuidos y se desea conocer el valor de la medición en un punto adicional x_{n+1} .

1. Se considera primero un punto adicional ficticio $n + 1$.
2. Se estima el valor en x_{n+1} mediante kriging.
3. Se obtiene la varianza de la estimación de kriging.

Finalmente, se repiten los puntos 1, 2 y 3, variando la posición del punto hasta obtener el óptimo, que minimice la varianza.

Los métodos se pueden clasificar como *globales* y *locales*, según se quiera estimar el valor medio de la propiedad de manera global o se pretenda mejorar localmente la estimación de la misma.

Estimación global

Pretende minimizar la varianza de la estimación del valor medio de la propiedad de manera general, es decir, se considera a la región donde se diseña la red como un todo. Se define el índice $R(x)$ de reducción relativa de la incertidumbre:

$$R(x) = \frac{\sigma_0^2 - \sigma^2(x)}{\sigma_0^2} \quad (10)$$

Donde:

- σ_0^2 = varianza de la estimación con los n puntos existentes.
- $\sigma^2(x)$ = varianza de la estimación con un punto adicional $n + 1$ en la posición x .

Algoritmo 1

Si existen posiciones predefinidas para x_{n+1} , entonces se calcula $\sigma^2(x)$ para todas las posiciones y se selecciona la que tiene mayor $R(x)$.

Algoritmo 2

Si no hay restricciones para la posición de x_{n+1} , entonces se puede calcular $\sigma^2(x)$ en una malla y dibujar las curvas de nivel para $R(x)$.

Estimación local

Persigue la minimización de la varianza en cierta zona de la red de manera local.

Este enfoque provoca que existan tantas varianzas como puntos a estimar, por lo que sólo se puede aspirar a eliminar los máximos de la incertidumbre.

1. Se añade un punto en las zonas de mayor incertidumbre.
2. Se calculan las curvas de nivel de las desviaciones típicas para los casos con y sin el punto, y se comparan los resultados.

Esto continúa hasta encontrar el punto que más reduzca la incertidumbre.

En ambos enfoques se podría repetir el algoritmo agregando otros puntos. Existen estrategias eficientes para la inclusión de más de un punto, como son:

- El método de inclusiones sucesivas.
- El método de intercambios sucesivos óptimos.
- El método de enumeración total.
- El método de rama y límite, etcétera.

Estrategias de optimización usando más de un punto

Para el caso de redes irregulares, éste representa un problema discreto, donde se trata de

seleccionar el mejor subconjunto de puntos de un conjunto dado.

a) Método de inclusiones sucesivas

Se añade sucesivamente el punto que minimiza la varianza en cada paso hasta completar un número de puntos prefijados o llegar a un nivel de varianza dado.

b) Método de intercambios sucesivos óptimos

Se elige un conjunto X_0 de puntos tales que al intercambiar uno de sus elementos por uno de los restantes no se disminuye la varianza, lo cual es una condición necesaria, pero no suficiente para obtener el conjunto óptimo.

Algoritmo

1. Sea $X_0 = \{t_1, t_2, \dots, t_{n-k}\}$ y $\{X_1 = t_{n-k+1}, \dots, t_N\}$ y j_1 .
2. Se intercambia el elemento j -ésimo de X_0 sistemáticamente con todos los de X_1 y se calculan las varianzas correspondientes.
3. Cuando la varianza disminuye, entonces se hace permanente el intercambio.
4. Se modifica el valor de j según:

$$j = \begin{cases} j+1, & \text{si } j < N \\ 1, & \text{si } j = N \end{cases}$$

y se retorna al paso 2. El proceso se detiene cuando ninguno de los elementos de X_0 puede ser intercambiado de forma tal que disminuya la varianza de la estimación.

c) Método de enumeración total

Se examinan todos los subconjuntos del conjunto $T = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$ que tengan $n - k$ elementos. Aquel que resulte de varianza mínima es el óptimo.

El número total de subconjuntos a evaluar sería:

$$\binom{N}{n-k} = \frac{N!}{(N-n+k)!(n-k)!} \quad (11)$$

Una manera sistemática sería empleando una búsqueda de árbol. Se comienza con el conjunto nulo o vacío. Tiene la dificultad de que el número de operaciones a realizar es muy grande.

d) Método de rama y límite

Similar al anterior, con las diferencias:

- El árbol se construye partiendo del conjunto total de puntos.
- Cuando se avanza por el árbol se elimina un punto y cuando se retrocede se añade.
- Se compara una condición adicional, que la varianza de la estimación sea menor o igual que la más pequeña de las calculadas hasta este momento con $n - k$ puntos; en caso contrario, no se continúa avanzando, ya que de hacerlo se incrementaría la misma. Tiene la ventaja con respecto al anterior que reduce el tiempo de cálculo.

La técnica de optimización utilizada en este estudio es el de inclusiones sucesivas y el algoritmo (Carrera, Usunoff, & Szidarovszky, 1984; Carrera & Szidarovszky, 1985; Díaz-Viera, 1997, 1998) consiste en: al conjunto m de puntos existentes lo designamos por $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ y al subconjunto óptimo de n puntos que minimizan la varianza de estimación lo designaremos como $X = \{x_{o1}, x_{o2}, \dots, x_{on}\}$.

Algoritmo

1. Para $j = 0$, $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ y $X_o = \{\emptyset\}$, donde $\emptyset$ = vacío.
2. Se calcula la varianza del error de estimación por kriging $\sigma^2(x_i)$ para i desde 1 hasta m y se selecciona el que tiene menor valor, de manera que el punto x_i se extrae del conjunto X y se incluye en el conjunto X_o resultando:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_{m-j}\} \text{ y } X_o = \{x_{o1}\}$$

3. Se incrementa $j = j + 1$.

4. Para todos los valores de i , desde 1 hasta $(m - j)$, se evalúa la expresión (10), o sea, $R(x_i) = \frac{\sigma_j^2 - \sigma_{j+1}^2(x_i)}{\sigma_j^2}$, que es el índice de reducción relativa.

donde:

σ_j^2 = varianza del error de la estimación con los j puntos que pertenecen a X_o .

σ_{j+1}^2 = varianza del error de la estimación con un punto adicional $j + 1$ en la posición x_i .

5. El punto x_i que más reduzca la varianza del error de estimación, es decir, que tenga mayor valor de $R(x_i)$, se selecciona de manera que se extrae del conjunto X y se agrega al conjunto X_o resultando:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\} \text{ y } X_o = \{x_{o1}, x_{o2}, \dots, x_{oj}\}$$

6. Mientras se cumpla que $j < n$ o $\sigma_j^2 < \text{tolerancia}$, se retorna al paso 3; en caso contrario, se termina el procedimiento.

Las ecuaciones para el cálculo de la inversa de la matriz de kriging y la varianza de estimación con $j + 1$ y $j - 1$ puntos, a partir de los valores obtenidos con j puntos, según Samper y Carrera (1990), se deduce: sea, $G \cdot \lambda = \gamma$ y sea λ_0 la solución de este sistema. Si se añade un nuevo punto x_{j+1} , las nuevas ecuaciones pueden escribirse como:

$$\begin{pmatrix} G & \vdots & g \\ \dots & \dots & \dots \\ g^t & \vdots & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda \\ \vdots \\ \lambda_{j+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma \\ \vdots \\ \gamma_{vj+1} \end{pmatrix} \quad (12)$$

Donde $g^t = (\gamma_{j+1,1}, \dots, \gamma_{j+1,j+1})$. La inversa de la nueva matriz de coeficientes viene dada por:

$$\begin{pmatrix} X & \vdots & y \\ \dots & \dots & \dots \\ y^t & \vdots & s \end{pmatrix} \quad (13)$$

donde:

$$s = \frac{1}{g^t G^{-1} g} \quad (14)$$

$$y = -G^{-1} g s$$

$$X = G^{-1} + s^{-1} y y^t$$

Y la solución del sistema puede expresarse como:

$$\lambda_{j+1} = s(\gamma_{vj+1} - g^t \lambda_o) \quad (15)$$

$$\lambda = \lambda_o - G^{-1} g \lambda_{j+1} \quad (16)$$

La nueva varianza, tras añadir el punto x_{j+1} es:

$$\sigma_{j+1}^2 = \sigma_j^2 - (\gamma_{vj+1} - g^t G^{-1} g)^2 / (g^t G^{-1} g) \quad (17)$$

Estas expresiones son de gran utilidad en los cálculos de las varianzas del error de estimación al adicionar un punto.

La metodología geoestadística utilizada consta de las siguientes etapas: análisis preliminar de los datos, análisis exploratorio, análisis variográfico y estimación espacial.

En la etapa de *análisis preliminar* se calculan los niveles piezométricos, restando las alturas de brocal de los pozos y las profundidades del nivel estático; se genera un archivo vectorial en formato shape de puntos, con los atributos de los aprovechamientos hidráulicos asociados (clave, profundidad del nivel estático, altura de brocal y nivel piezométrico), cambiando de datum de NAD27 a ITRF92 y de proyección cartográfica de universal transversa de mercator (UTM) a cónica conforme de Lambert (CCL), a través de las ecuaciones citadas en Leick (1990).

Se realiza la sobreposición de la capa de curvas de nivel topográficas a escala 1:250 000, límites de las localidades urbanas (datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía) y el polígono del acuífero en cuestión, para verificar la posición de los pozos y sus atributos.

En la etapa de *análisis exploratorio* se calculan los parámetros estadísticos básicos, como media, varianza, desviación estándar, cuartiles, valor máximo, valor mínimo, coeficiente de curtosis y asimetría. Asimismo, generar el histograma de frecuencias, las gráficas de Q-Q Plot y de caja. Se plantea detectar los valores atípicos, separarlos de los demás datos y volver a calcular los parámetros estadísticos básicos. La idea es realizar un análisis gráfico-numérico de la naturaleza de los datos, evaluar algunos supuestos, como la normalidad, linealidad y homocedasticidad (Armstrong & Delfiner, 1980); evaluar la presencia de los valores atípicos, los cuales son los valores que exceden los límites establecidos por la siguiente expresión (Díaz-Viera & Barandela, 1994; Díaz-Viera, Hernández-Maldonado, & Méndez-Venegas, 2010):

$$\text{Límite superior} = q(0.75) + 1.5 iq$$

$$\text{Límite inferior} = q(0.25) - 1.5 iq$$

Donde $q(p)$ son los cuantiles, mientras que iq es el rango intercuartil (diferencia entre el tercer y el primer cuartil); los valores atípicos pueden influir de manera significativa en etapas posteriores del análisis geoestadístico (Cressie & Hawkins, 1980; Díaz-Viera, 2002), y en el impacto de la ausencia de datos.

En la etapa de *análisis variográfico* se estiman, en primer término, las semivarianzas adireccionales; del mismo modo, las semivarianzas para las direcciones de 45, 90 y 270° a diferentes distancias, analizándose para determinar la posible presencia de anisotropía. En caso de existir anisotropía, se estima la dirección de ésta, y los alcances de menor y mayor valor para su consideración. Asimismo, se obtiene el modelo de semivariograma que mejor se ajuste a los datos siguiendo el criterio de información de Akaike (AIC) (Akaike, 1974, 1977), el cual relaciona la complejidad del modelo (número de parámetros) y la bondad de ajuste (error medio cuadrático); se le aplica la validación cruzada, en específico el método "leave one out" mencionado por Journel y

Huïjbregts (1978), que consiste en dejar un punto conocido fuera de la estimación, y proceder a calcular su valor con kriging ordinario, utilizando los parámetros del modelo del semivariograma obtenido; de forma análoga se procede con los demás puntos, consiguiendo las diferencias entre el valor real y el estimado; se analizan las estadísticas de estas diferencias y se espera que el valor medio sea cercano a cero, una varianza pequeña y una varianza normalizada cercano a uno, lo anterior según Omre (1984).

Si se detecta presencia de tendencia espacial $M(x, y)$, se procede a estimar dicha tendencia a partir de polinomios de primer o segundo grado; posteriormente se realiza la diferencia al valor conocido $Z(x, y)$, quedando un residual $R(x, y)$, es decir, $R(x, y) = Z(x, y) - M(x, y)$; entonces todo el procedimiento geoestadístico se aplicará sobre los residuales $R(x, y)$.

La finalidad principal de esta etapa es estimar y modelar una función que refleje la correlación espacial de los niveles piezométricos a partir de la adopción razonada de la hipótesis más adecuada acerca de su variabilidad.

En la *estimación espacial* se generará una malla de puntos en el área de estudio, considerando las coordenadas extremas del polígono del acuífero; la resolución de esta malla será de 500 por 500 metros, lo anterior, considerando la resolución espacial de los datos conocidos; posteriormente, basado en los parámetros del modelo de semivariograma que se obtenga en el análisis variográfico, se procederá a estimar en cada nodo de la malla la variable en estudio (nivel piezométrico o el residual de éste) y la varianza del error de estimación; para lo anterior, se buscarán los 16 pozos más cercanos a cada nodo. Moral-García (2003) recomienda poco más de una decena para esta operación. Para estas estimaciones se utilizará kriging puntual ordinario.

Características del área y datos de estudio

El área de estudio (figura 1) es el acuífero "Saltillo-Ramos Arizpe". Se localiza en el

sureste de Coahuila de Zaragoza, México, y cubre parte de los municipios de Saltillo, Ramos Arizpe y Arteaga; se enmarca entre las coordenadas geográficas $101^{\circ} 06'$ y $100^{\circ} 47'$ longitud oeste, y $25^{\circ} 35'$ y $25^{\circ} 20'$ de latitud norte, datum ITRF92. Al sur y sureste colinda con la sierra de Zapalinamé; al oriente, con la sierra de Arteaga, sierra San Lucas y sierra San José de los Nuncios; y al poniente, con la sierra El Asta y sierra Palma Gorda. Dentro del área que ocupa el acuífero se encuentra la ciudad de Saltillo, capital del estado de Coahuila de Zaragoza, y las poblaciones de Ramos Arizpe y Arteaga.

Las coordenadas de los vértices que conforman la poligonal de este acuífero y la ubicación de los pozos se transformaron al datum ITRF92 y en la proyección cartográfica cónica conforme de Lambert (CCL), utilizando los siguientes parámetros:

- Falso este: 2 500 000 m.
- Falso norte: 0 m.
- Primer paralelo: 17.5° .
- Segundo paralelo: 29.5° .
- Paralelo de origen: 12° norte.
- Meridiano de origen: 102° oeste.

La zona se localiza en la provincia fisiográfica de las sierras y cuencas, en el límite de la provincia de la Sierra Madre Oriental (Conagua, 2010). Las características fisiográficas son de dos tipos: a) la zona de topografía relativamente suave corresponde al Valle de Saltillo-Ramos Arizpe, en donde la elevación del terreno disminuye hacia el norte, con valores de 1 800 a 1 200 msnm; y b) la zona de sierras del poniente, orientadas este-oeste, que se caracterizan por una topografía abrupta, con elevaciones máximas de 2 400 msnm.

Está formado en la parte del valle por los depósitos aluviales, conglomerado Reynosa y lutitas fracturadas de la formación Parras. Las rocas areniscas fracturadas del grupo Difunta forman parte de este acuífero en las zonas de las sierras localizadas al oeste y noroeste del valle.

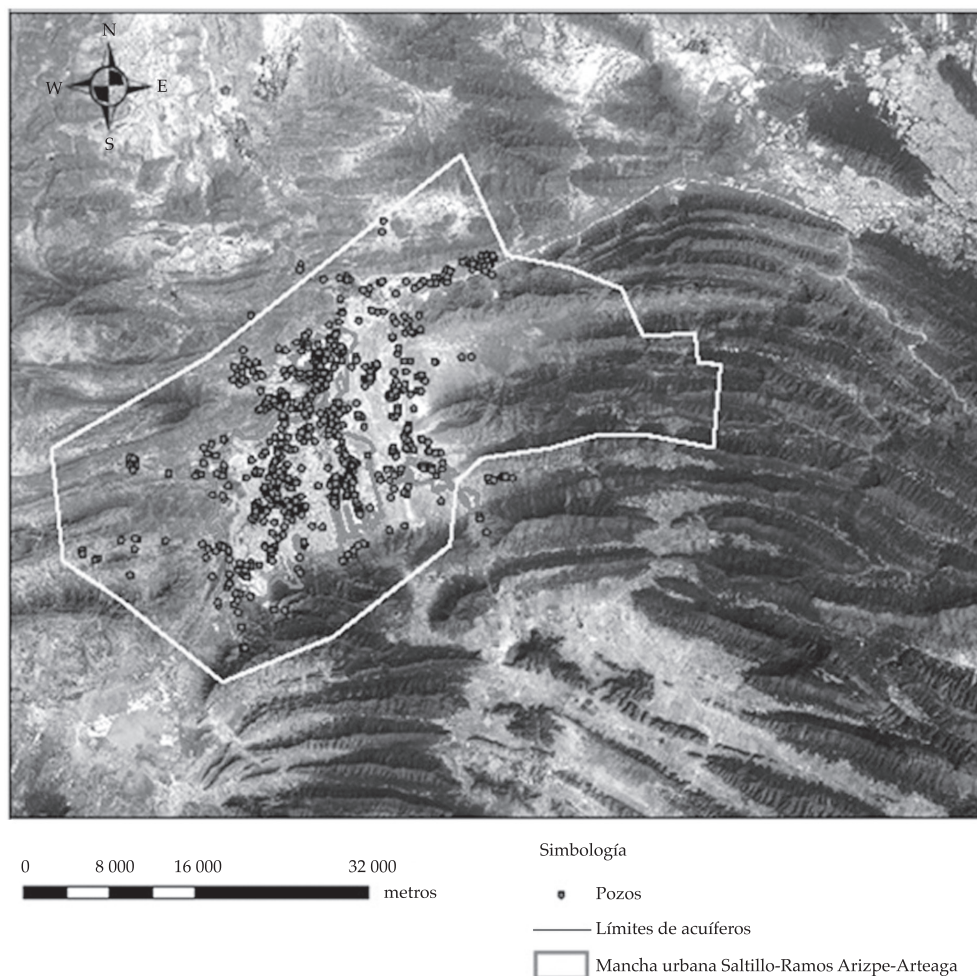


Figura 1. Ubicación del acuífero "Saltillo_Ramos Arizpe" y los 750 aprovechamientos hidráulicos.

Es un acuífero de tipo semiconfinado y el basamento hidrogeológico —definiendo basamento a la profundidad a la cual las fracturas en la Formación Parras desaparecen o se cierran a profundidad— se ubica a 250 y 450 m.

Los límites del acuífero de carácter impermeable son el contacto entre la Formación Parras fracturada y la Formación Indidura de baja permeabilidad, al oeste y sureste del valle.

El acuífero consta de 750 aprovechamientos hidráulicos. Los registros de éstos fueron proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (Conagua) de un estudio geohidrológico realizado en 2007.

Resultados

Análisis preliminar

De 750 aprovechamientos hidráulicos (figura 1), 413 cuentan con registros de profundidad de nivel estático. Se revisaron las alturas de los brocales de estos últimos pozos con respecto a las curvas de nivel de la carta topográfica escala 1:250 000, serie III de INEGI; detectándose inconsistente una altura de brocal (pozo SRA-071), con un valor de 5 261 m, ubicándose entre las curvas de nivel topográficas de 1 500 y 1 600 m; asimismo, cuatro no contaban con dicho valor (claves SRA-292, SRA-423, SRA-424, SRA-425),

resultando 408 pozos con datos consistentes. Se calcularon los niveles piezométricos para los análisis subsecuentes.

Análisis exploratorio

Los 408 niveles piezométricos presentaron tendencia espacial, ya que las semivarianzas que se calcularon no se acotan en la línea de la varianza (figura 2). Para eliminar la tendencia espacial, se realiza un ajuste polinomial de primer grado a los datos. Se obtienen los siguientes coeficientes:

$$\begin{aligned} a &= 29\,674.64084 \text{ m} \\ b &= -0.002119162 \text{ m} \\ c &= -0.0151855557 \text{ m} \end{aligned}$$

Para expresar esta variable en la forma:

$$Z(x, y) = M(x, y) + R(x, y) \quad (18)$$

Donde $M(x, y) = a + b * X + c * Y$ es la tendencia y $R(x) = Z(x) - M(x, y)$ son los residuales de los niveles piezométricos.

Se realiza el análisis exploratorio de los residuales $R(x)$; se detectan y eliminan 26 valores atípicos.

En el cuadro 1 se visualiza que la asimetría es positiva, con un valor de 0.2883 m; la media (-2.9250) es mayor que la mediana (-5.2860), obteniéndose un rango intercuartil de 71.24 m.

En el histograma de frecuencias (figura 2) se alcanza a distinguir la asimetría positiva. En la gráfica de cajas se observa que la media es mayor que la mediana, notando aún algunos valores atípicos.

Análisis variográfico

Se estimaron las semivarianzas, las cuales ya se acotan a la línea de la varianza (figura 3), obteniéndose un modelo de semivariograma adireccional, resultando con los siguientes parámetros:

- Modelo: esférico.
- Pepita: 130.4765 m.

- Meseta-pepita: 739.8475 m.
- Alcance: 6 708.8846 m.
- AIC: 4527.1123.

Asimismo, se visualiza gráficamente la validación cruzada del modelo de semivariograma, obteniéndose un coeficiente de regresión de 0.984. Las estadísticas obtenidas de la validación son:

Media de las diferencias entre el valor real y el estimado	-0.21699 m
Varianza de las diferencias entre el valor real y el estimado	59 365.26
Media de las diferencias normalizadas	-0.111604
Varianza de las diferencias normalizadas	9.755

La diferencia normalizada es la diferencia entre el valor real de la variable y el estimado, inversamente proporcional con la desviación estándar del error de estimación.

Análisis de anisotropía

En la figura 4 se visualiza que los valores de las semivarianzas son similares en todas direcciones; se observa un comportamiento isotrópico, determinándose que no hay presencia de anisotropía o al menos no existen los suficientes elementos para determinar su presencia.

Estimación espacial

Con los parámetros del modelo de semivariograma obtenidos en el análisis variográfico se realiza la estimación espacial, aplicando kriging puntual ordinario y utilizando una malla de 500 por 500 metros, considerando el espacio que cubre el polígono del acuífero en cuestión.

En la figura 5 se muestra el mapa en 3D de los residuales estimados de los niveles piezométricos; los valores representados van de -60.8 a 73.9 metros.

En la figura 6 se observan las desviaciones estándares del error de estimación más grandes

Cuadro 1. Parámetros estadísticos básicos de los residuales sin los 26 valores atípicos.

Parámetros	Valor
Total de datos	382
Distancia máxima	50 078.43
Media	-2.9250
Varianza	826.2219
Desviación estándar	28.7441
Coefficiente de variación	9.8285
Mediana	-5.2860
Primer cuartil (Q1)	-20.32
Segundo cuartil (Q3)	13.24
Rango intercuartil	71.24
Asimetría	0.2883
Curtosis	3.0251
Valor máximo	71.2412
Valor mínimo	-68.9487

Cuadro 2. Variación de la desviación estándar de la estimación con respecto al número de pozos.

Núm. de pozos	Desviación estándar del error de estimación (m)
1	862.96
50	24.73
60	23.54
70	22.78
80	22.22
90	21.84
100	21.58
110	21.38
120	21.22
130	21.11
140	21.03
144	21.00
150	20.96
160	20.9
200	20.76
300	20.65
400	20.63
450	20.62

(29.5 m) ubicadas en la periferia de la zona mapeada; y las desviaciones más pequeñas (14.2 m) se distribuyen a lo largo del mapa

de suroeste a noreste, cercanos a los pozos utilizados para determinar el modelo del semivariograma.

Una vez estimados los residuales $\hat{R}(x,y)$, se les adicionó la tendencia $M(x,y)$ utilizando la ecuación (18), para obtener los niveles piezométricos estimados $\hat{Z}(x,y)$.

En la figura 7 se observa el mapa en 2D de los niveles piezométricos estimados; van en la dirección suroeste a noreste, con valores de 1 786.96 a 1 181.94 m.

Optimización utilizando inclusiones sucesivas

A continuación se muestran los resultados de la optimización. Se presentan dos variantes:

Optimización considerando una tolerancia en la desviación estándar del error de estimación

En la figura 8 se visualiza el comportamiento de la desviación estándar del error de estimación con kriging ordinario en bloques, a medida que se adicionan pozos por inclusiones sucesivas.

A partir de 144 pozos, el valor de la desviación estándar del error de estimación presenta variación a nivel de centímetros, resultando un valor de 21 m, como se puede observar en el cuadro 2.

En la figura 9 se visualiza la distribución espacial de los 144 pozos. Se observa que cubren la mayor parte del acuífero, excepto en la zona noreste, en donde no se cuenta con pozos.

Optimización prefijando cantidad de pozos

En el cuadro 3 se presenta la comparación de los parámetros estadísticos básicos de la desviación estándar del error de estimación con kriging puntual ordinario de los mejores pozos para el monitoreo obtenidos en la optimización, prefijando una cantidad de éstos.

Se observa que la media y mediana disminuyen conforme aumenta la cantidad de pozos; caso contrario sucede con la varianza y, por lo tanto, con la desviación estándar.

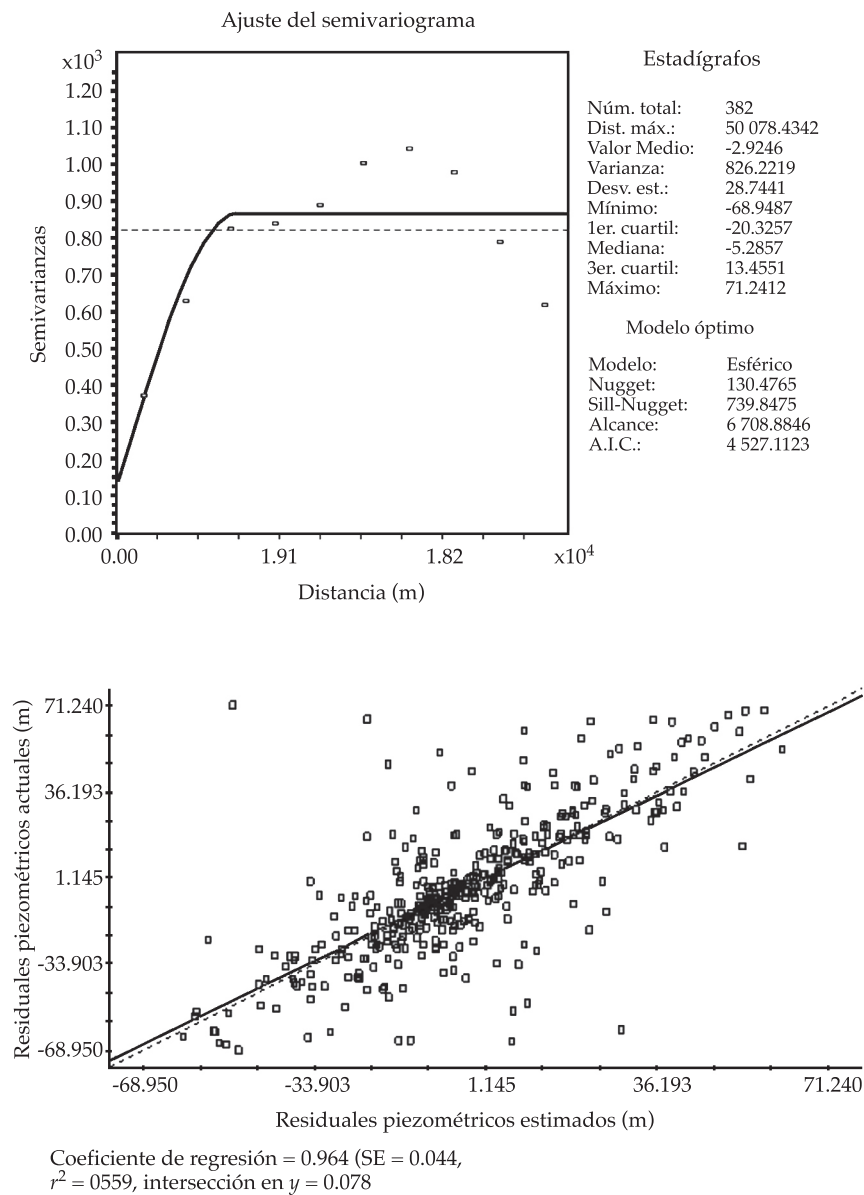


Figura 3. Ajuste y validación cruzada del modelo de semivariograma.

En la figura 10 se muestra la ubicación de los mejores 50 pozos; se nota que se distribuyen por el acuífero, faltando en la zona este, donde no existen pozos

Discusión

Este estudio fue realizado considerando los niveles piezométricos de los pozos del acuífero en cuestión. Dichos datos presentaron tendencia

espacial, la cual fue estimada por medio de un ajuste polinomial de primer grado y restada a los datos originales obteniendo residuales.

El análisis geoestadístico subsecuente y la optimización se realizó utilizando los residuales obtenidos para no verse afectados por la falta de estacionaridad.

El modelo de semivariograma obtenido es esférico, no se detectó la presencia de anisotropía, es decir, resultó isotrópico.

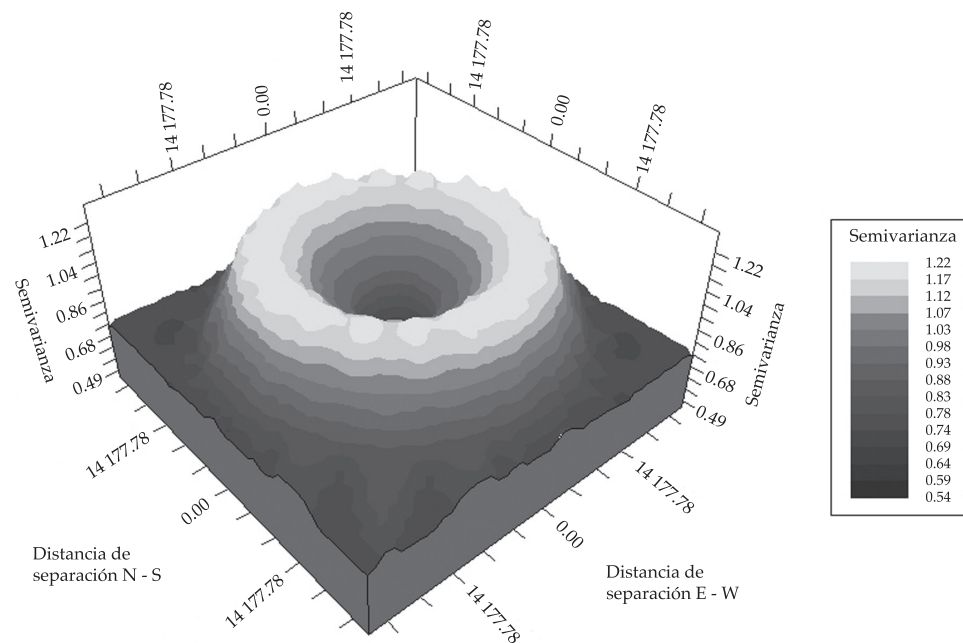


Figura 4. Semivarianzas a direcciones 0, 45, 90 y 135°, y a diferentes distancias.

Estimación de residuales de los niveles piezométricos. Kriging puntual ordinario

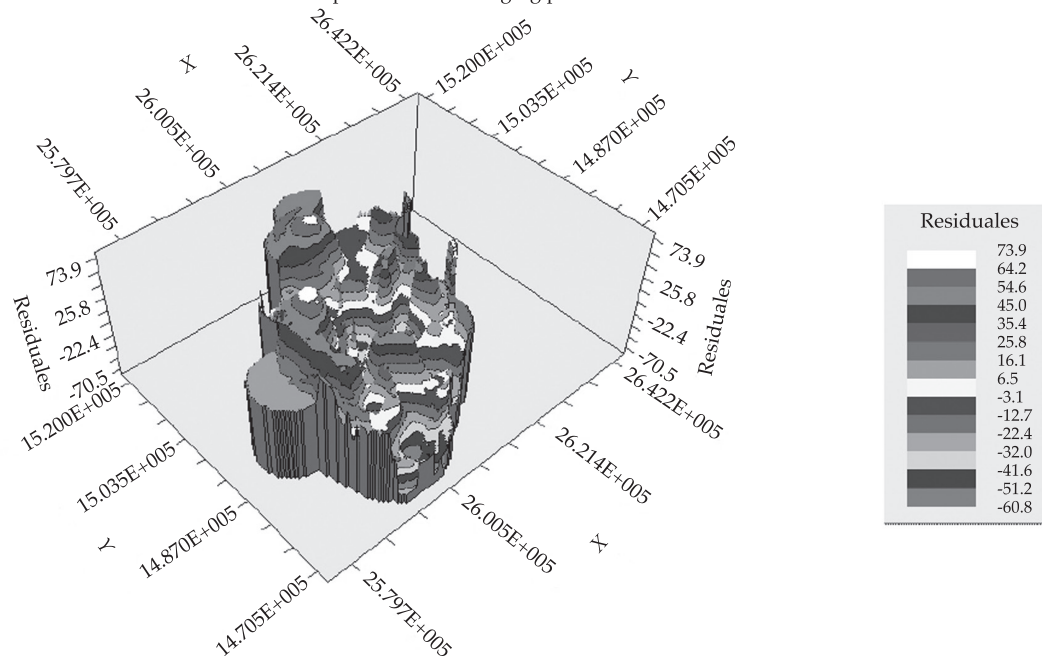


Figura 5. Mapa en 3D de los residuales estimados de los niveles piezométricos.

Desviación estándar de la estimación sin optimizar. Kriging puntual ordinario

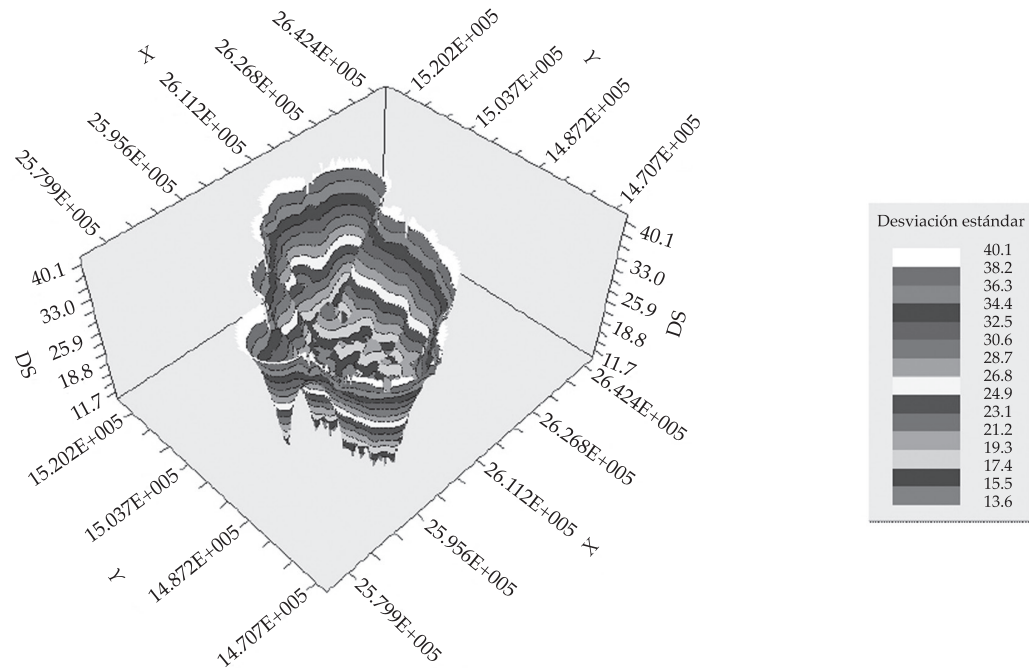


Figura 6. Vista en 3D de las desviaciones estándar del error de estimación de los residuales.

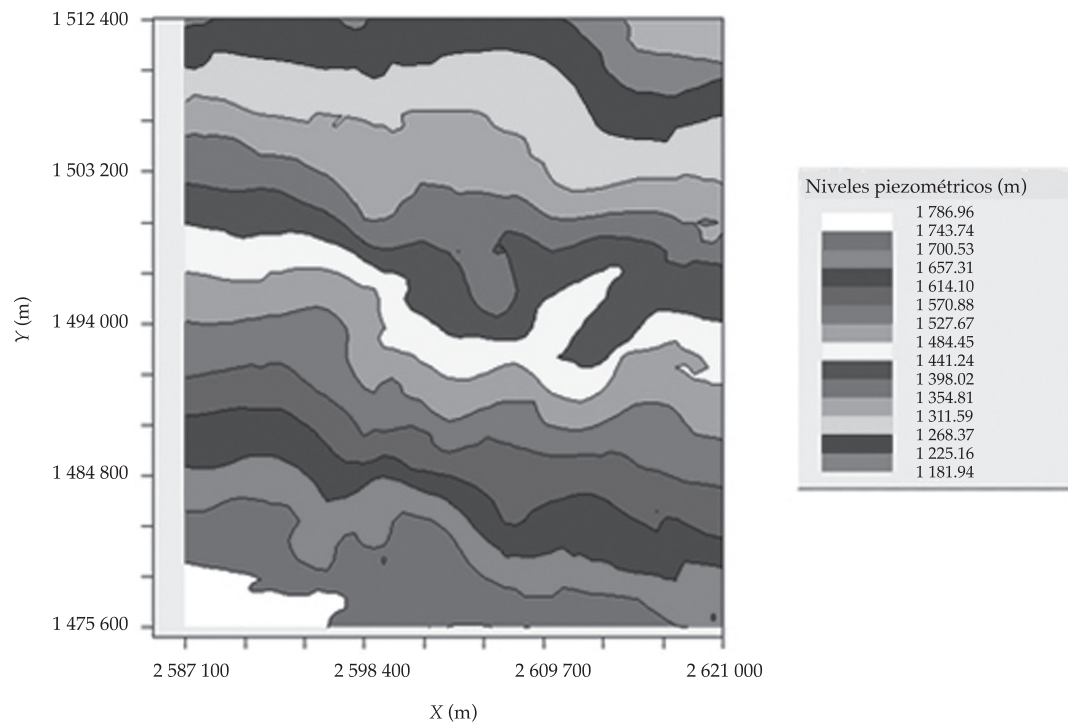


Figura 7. Mapa en 2D de los niveles piezométricos estimados utilizando kriging puntual ordinario.

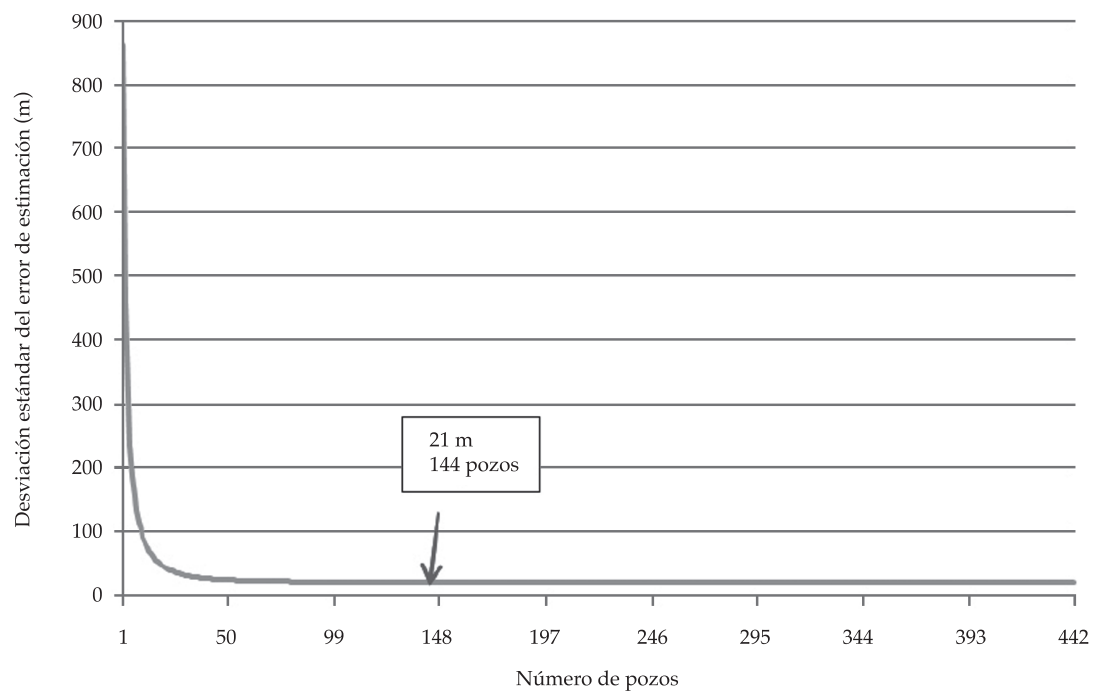


Figura 8. Comportamiento de la desviación estándar del error de estimación por kriging ordinario en bloques.

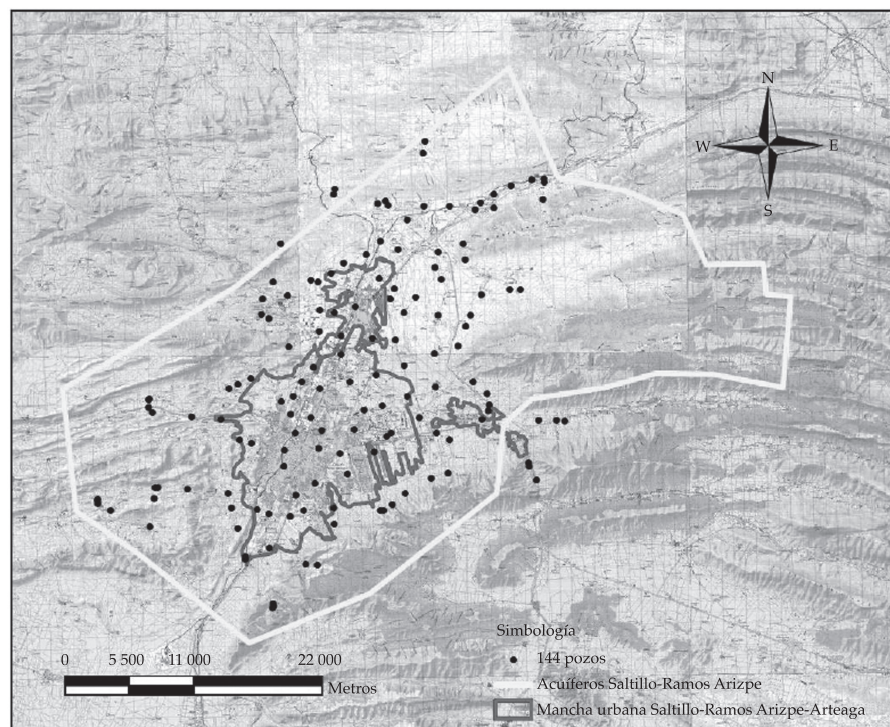


Figura 9. Distribución espacial de los 144 pozos que conforman la red óptima determinada.

Cuadro 3. Comparación de parámetros estadísticos básicos de la desviación estándar del error de estimación de los mejores pozos.

Parámetro estadístico	Toda la red	Red óptima (21 m)	Pozos que ofrecen mayor certidumbre en la estimación					
			50	100	200	300	400	500
Número de pozos	750	3 144	50	100	200	300	400	500
Media	26.9734	27.6769	29.8205	28.1804	27.3404	27.1512	27.0601	26.9889
Varianza	87.9695	73.9683	54.0006	68.5659	78.8585	82.3256	84.8264	86.5767
Desviación estándar	9.3792	8.6004	7.3485	8.2805	8.8802	9.0733	9.2101	9.3047
Coefficiente de variación	0.3477	0.3107	0.2464	0.2938	0.3248	0.3342	0.3404	0.3448
Valor mínimo	11.6435	11.7095	11.7134	11.7095	11.7089	11.7089	11.6436	11.6436
Primer cuartil (0.25)	18.4486	20.0717	24.4888	21.1941	19.2468	18.8975	18.6577	18.4234
Mediana	26.1632	29.1670	27.8962	26.4394	26.0529	26.0700	26.0860	26.1025
Tercer cuartil (0.75)	35.1362	35.0940	35.6206	35.2252	35.0515	35.0223	35.0644	35.0713
Valor máximo	43.2565	43.2565	43.2565	43.2565	43.2565	43.2565	43.2565	43.2565
Asimetría	0.1899	0.3257	0.3394	0.3487	0.2971	0.2594	0.2314	0.2144
Kurtosis	1.7406	1.8237	2.1486	1.8832	1.7776	1.7635	1.7464	1.7401

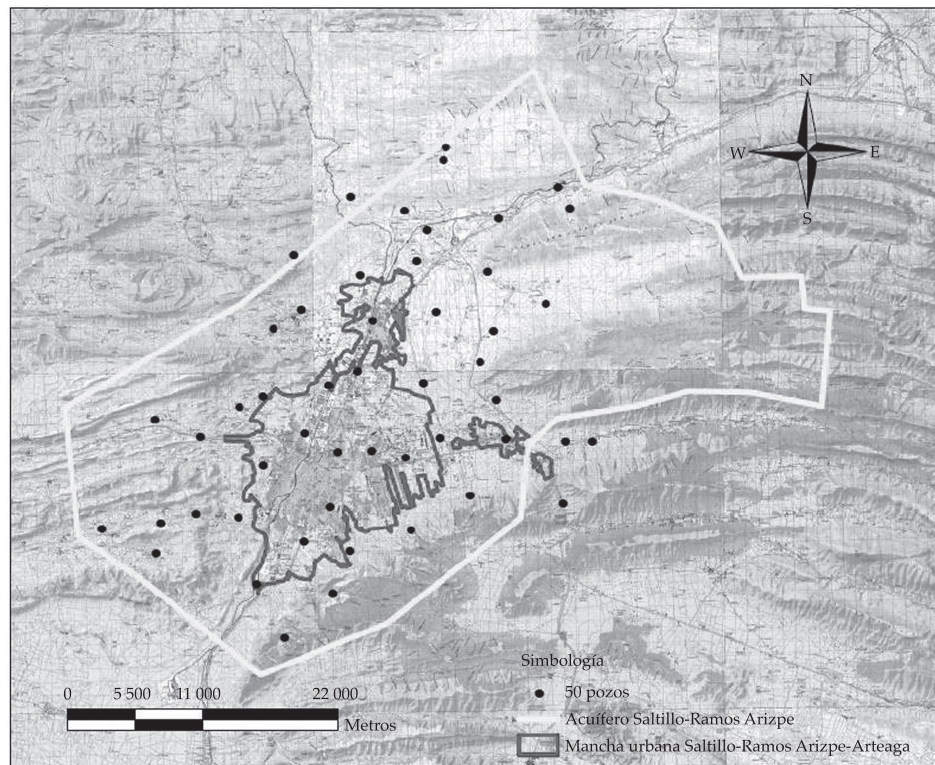


Figura 10. Ubicación de los 50 pozos que ofrecen mayor certidumbre de estimación.

En la estimación espacial de los niveles piezométricos, a los residuales estimados se les adicionó la tendencia espacial calculada. Se

observó que en gran parte del acuífero se realiza la estimación con kriging puntual ordinario, dejando sólo algunas zonas sin cubrir debido

a que no existen pozos vecinos para realizar la estimación; se observan conos de abatimiento en el acuífero.

En la optimización, considerando una tolerancia de la desviación estándar del error de estimación, se observó que existe una convergencia del error cercano a los 50 pozos adicionados por la técnica de las inclusiones sucesivas; sin embargo, a partir de 144 pozos, se observó una variación a nivel de centímetros, y ese fue el criterio elegido para detener la inclusión de más pozos.

Es importante mencionar que los pozos obtenidos de la optimización, prefijando cantidad de pozos, son los que ofrecen los valores más altos del índice de reducción relativa; es decir, son los mejores 50, 100, 200, 300 400 y 500 pozos para el monitoreo del acuífero.

Conclusiones

En el presente trabajo se cumplieron los objetivos planteados, aplicando la metodología definida para obtener el diseño óptimo de la red de monitoreo con fines de manejo del acuífero "Saltillo-Ramos Arizpe", a partir del análisis geoestadístico de los datos de niveles piezométricos, utilizando kriging ordinario para la estimación y la técnica de optimización de inclusiones sucesivas.

El diseño óptimo de la red se realizó considerando los límites del acuífero definidos por la Conagua, sin considerar otros parámetros geohidrológicos de la zona de estudio. Cabe señalar que la metodología utilizada es aplicable para cualquier área y tipo de variable regionalizada en estudio.

Se utilizaron 382 datos de niveles piezométricos de pozos para la determinación del modelo de semivariograma de los 750 que existen, representando un 50.9% del total, por lo que se concluye que es una cantidad suficiente para la modelación de la correlación espacial de dicha variable.

La red óptima determinada consta de 144 pozos, alcanzando una desviación estándar

del error de estimación por kriging ordinario en bloques de 21 metros, lo que representa un 19.2% de los 750 pozos existentes en el acuífero y significaría ahorrar un 80.8% en el costo de monitoreo en pozos.

La optimización, dada una cantidad fija de pozos, permite determinar los mejores pozos para el monitoreo, escogiendo el número de éstos que se consideren convenientes de acuerdo con el recurso que se tenga disponible.

Para futuros trabajos de tal naturaleza en este acuífero, se recomienda subdividir el acuífero considerando su naturaleza hidrogeológica e incorporar los modelos de flujo de agua subterránea que existan.

Agradecimientos

Al Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, al Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Dirección Regional Noreste, y a la Comisión Nacional del Agua, Delegación Saltillo, Coahuila de Zaragoza, por las facilidades brindadas para realizar este estudio.

Referencias

- Akaike, H. (1974). A New Look at Statistical Model Identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-19, 716-722.
- Akaike, H. (1977). An Entropy Maximization Principle. In P. R. Krishnaiah (Ed.). *Applications of Statistic*. Amsterdam: North Holland.
- Armstrong, M., & Delfiner, P. (1980). Towards a More Robust Variogram: Case Study on Coal. Note n_671. Fontainebleau, France: CGMM.
- Banajevic, M., & Switzer, P. (2002). *Optimal Network Designs in Spatial Statistics*. Stanford: Stanford University.
- Carrera, J., Usunoff, E., & Szidarovszky, F. (1984). A Method for Optimal Network Design for Groundwater Management. *Journal of Hydrology*, 73, 147-163.
- Carrera, J., & Szidarovszky, F. (1985). Numerical Comparison of Network Design Algorithms for Regionalized Variables. *Appl. Math. Comput.*, 16, 189-202.
- Chiles, J. P., & Delfiner, P. (1999). *Geostatistics Modeling Spatial Uncertainty* (157-158 pp.). New York: John Wiley & Sons.
- Cressie, N., & Hawkins, D. M. (1980). Robust Estimation of the Variogram. *Math. Geol.*, 12, 115-126.

- Conagua (junio de 2010). *Sección Aguas Nacionales. Sistema Nacional de Información del Agua (Sina)*. Comisión Nacional del Agua. Recuperado de <http://www.cna.gob.mx/>.
- Cousens, R. D., Brown, R. W., Mcbratney, A. B., & Moerkkerk, M. (2002). Sampling Strategy is Important for Producing Weed Population Maps: A Case Study Using Kriging. *Weed Science*, 50, 542-546.
- Díaz-Viera, M. (2002). *Notas del Curso: Geoestadística Aplicada* (135 pp.). México, DF: Instituto de Geofísica, UNAM, Instituto de Geofísica y Astronomía, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba.
- Díaz-Viera, M., Hernández-Maldonado, V., & Méndez-Venegas, J. (2010). *RGEOESTAD: un programa de código abierto para aplicaciones geoestadísticas basado en R-Project*, México. Recuperado de <http://mmc2.geofisica.unam.mx/gmee/paquetes.html>.
- Díaz-Viera, M., & Barandela, R. (agosto de 1994). *GEOESTAD: un sistema de computación para el desarrollo de aplicaciones geoestadísticas*. Memorias del II Taller Internacional Informática y Geociencias, GEOINFO'94, Ciudad de la Habana, Cuba.
- Díaz-Viera, M. (11-15 noviembre de 1997). *DISRED: una herramienta para el diseño de redes de monitoreo usando un enfoque geoestadístico*. Primer Congreso Nacional de Aguas Subterráneas, Mérida, México.
- Díaz-Viera, M. (24-27 de marzo de 1998). El diseño de redes óptimas de monitoreo en aguas subterráneas usando un enfoque geoestadístico. *Memorias del IV Taller Internacional Informática y Geociencias* (pp. 66-69). GEOINFO'98, Ciudad de la Habana, Cuba.
- Dixon, W., Smyth, G. K., & Chiswell, B. (March, 1999). Optimized Selection of River Sampling Dites. *Water Research*, 33(4), 971-978.
- Journel, A. G., & Huijbregts, Ch. J. (1978). *Mining Geostatistics* (590 pp.). London: Academic Press.
- INEGI (junio de 2010). *Apartado Geografía*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/>.
- Isaaks, E. H., & Srivastava, R. M. (1989). *An Introduction to Applied Geostatistics* (278-279 pp.). New York/ Oxford: Oxford University Press.
- Leick, A. (1990). *GPS Satellite Surveying* (pp. 284-301). Orono, USA: University of Maine.
- Lloyd, C. D., & Atkinson, P. M. *Designing optimal sampling configurations with ordinary and indicator kriging*. In *Proceedings of the 4th International Conference on GeoComputation*. 1999.
- Moral-García, F. A. (2003). *La representación gráfica de las variables regionalizadas. geoestadística lineal* (pp. 71-74). Cáceres, España: Universidad de Extremadura.
- Olea, R. A. (1999). *Geostatistics for Engineers and Earth Scientists* (pp. 7-16) Lawrence, USA: Kansas Geological Survey, The University of Kansas.
- Omre, H. (1984). *The Variogram and its Estimation. Geostatistics for Natural Resources Characterization* (107-125 pp.). Vol. 1. Verly et al. (Eds.). Hingham: NATO ASI Series. Reidel.
- Prakash, M. R., & Singh, V. S. (April, 2000). Network Design for Groundwater Monitoring – A Case Study. *Environmental Geology*, 39(6), 628-632.
- Samper, C. F. J., & Carrera, R. J. (1990). *Geoestadística. Aplicaciones a la Hidrogeología Subterránea* (pp. 409-427). Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería.
- Wang, X. J., & Qi, F. (December 11, 1998). The Effects of Sampling Design on Spatial Structure Analysis of Contaminated Soil. *The Science of the Total Environment*, 224(1-3), 29-41.

Dirección institucional de los autores

Dr. Martín A. Díaz-Viera

Investigador
Instituto Mexicano del Petróleo
Programa de Recuperación de Hidrocarburos
Eje Central Norte Lázaro Cárdenas 152
Col. San Bartolo Atepehuacan
Delegación Gustavo A. Madero
Apdo. Postal 14-805
07730 México, D.F., MÉXICO
Teléfonos: +52 (55) 9175 6473 y 9175 6993
Fax: +52 (55) 9175 6993
mdiazv@imp.mx
mdiazv64@yahoo.com.mx

M. en C. Félix Canul-Pech

Instituto Nacional de Estadística y Geografía
Dirección Regional Noreste
Pino Suárez No. 602 Sur, Col. Centro
64000 Monterrey, Nuevo León, MÉXICO
Teléfonos: +52 (81) 8152 8250 y 8152 8249
felix.canul@inegi.org.mx
fcanul2003@yahoo.com.mx



Haga clic aquí para escribir al autor



Cuenca alta del río Pixquiac, Veracruz, México.

Foto: Marta Magdalena Chávez Cortés.

Esquema de cobro del servicio hidrológico que provee la cuenca alta del Pixquiac

• Marta Magdalena Chávez-Cortés* • Karla Erika Mancilla-Hernández •
Universidad Autónoma Metropolitana, Xochimilco, México

*Autor de correspondencia

Resumen

Chávez-Cortés, M. M., & Mancilla-Hernández, K. E. (septiembre-octubre, 2014). Esquema de cobro del servicio hidrológico que provee la cuenca alta del Pixquiac. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(5), 161-177.

Desde el punto de vista hidrológico, los bosques otorgan múltiples beneficios a la sociedad, entre ellos la captación y limpieza del agua. Sin embargo, siguen siendo sujetos a dimensiones alarmantes de deforestación, por lo que el pago por servicios ambientales puede verse como una estrategia prometedora para su conservación. En tal contexto, este trabajo se orientó a construir una propuesta de tarifa hídrica que pudiera ser aplicada a los usuarios del agua en la cuenca del río Pixquiac, para lo cual se utilizó el método de costo de oportunidad para asignarle valor al bosque. Los resultados indican que la principal actividad económica que compite con el uso de suelo forestal es la ganadería, y que el monto de la compensación que deben pagar los usuarios por los servicios hídricos que presta el bosque asciende a \$0.473/m³ durante el primer año y \$0.232/m³ del año dos al diez. Se concluye que el precio del mercado de la actividad que compite con la conservación del bosque es un factor determinante en la factibilidad de la aplicación de una tarifa hídrica. También que la aplicabilidad de la tarifa dependerá de la voluntad de pago de los usuarios del agua y de su nivel de ingresos. De aquí la necesidad de complementar esta investigación con un estudio de valoración contingente en donde se determine el monto que los usuarios estarían dispuestos a pagar por seguir contando con agua suficiente en calidad y cantidad para satisfacer sus necesidades reales.

Palabras clave: pago por servicios ambientales, captación de agua, tarifa hídrica.

Abstract

Chávez-Cortés, M. M., & Mancilla-Hernández, K. E. (September-October, 2014). Charging Scheme for Hydrological Services Provided by the Upper Pixquiac River Watershed. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(5), 161-177.

From a hydrological point of view, forests provide multiple benefits to society; among them, water collection and purification. Yet they are still subjected to alarming rates of deforestation, which is why the payment of environmental services is seen as a promising conservation strategy. The goal of this work was to determine a water tariff that can be applied to water users in the Pixquiac River watershed, using the opportunity cost method. Our results show cattle to be the main economic activity competing for land use. The study determined that the amount consumers should pay for water services provided by the forest is \$0.473/m³ during the first year and \$0.232/m³ from year two to year ten. It concludes that the market price for the activity competing with forest conservation is a determinant of the feasibility of applying a water tariff. The applicability of the tariff will also depend on the consumers' willingness to pay and their income level. Hence the need to complement this research with a contingent valuation study to determine the amount consumers would be willing to pay to have water in enough quantity and quality to satisfy their current needs.

Keywords: Economic-ecological evaluation, payment for environmental services, water collection, hydrological monetary rate.

Recibido: 29/10/13

Aceptado: 19/03/14

Introducción

El agua es uno de los recursos estratégicos de este siglo tanto a escala local como global. Su profusa presencia en el planeta (38 millones de km³) contrasta con su desigual distribución, y el hecho de ser un elemento esencial para la vida hace que, en la actualidad, sea el centro de muchos conflictos. La disponibilidad de

agua, junto con la degradación del suelo y la pérdida de la biodiversidad, son considerados los principales problemas que amenazan a los recursos naturales, y a la preservación y buen funcionamiento de los sistemas que soportan la vida (Chávez, 2007).

En México se ha señalado que la disponibilidad de agua es uno de los problemas más serios que se deberá enfrentar durante las próximas

dos décadas, pues cerca del 11% de la población encara problemas de escasez de agua. Aunado a esto, nuestro país se ha desarrollado de manera inversa con la disponibilidad de agua, ya que el 76% de la población vive donde se localiza tan sólo el 20% del agua dulce disponible. Como consecuencia, la sobreexplotación de los acuíferos, las costosas transferencias de una cuenca a otra para satisfacer las crecientes demandas y los conflictos entre usuarios en competencia se han incrementado durante los últimos 20 años (Chávez, 2007).

Dentro de los factores que han favorecido esta problemática del agua podemos mencionar los siguientes: 1) la falta de entendimiento de la relación ecosistema y agua; 2) el desconocimiento de los beneficios que proveen los ecosistemas; 3) el entendimiento limitado de cómo los ecosistemas sustentan una amplia gama de procesos de producción y consumo, y 4) la limitada valoración de los ecosistemas en la toma de decisiones, por la carencia de mercados para los bienes y servicios que proporcionan (Emerton & Bos, 2004; Ramírez-Chasco, Cabreas-Palacios, Seco-Meneses, & Torres-Escribano, 2004; MEA, 2007).

Estos cuatro aspectos aplican al caso de los ecosistemas forestales, pues a pesar de los beneficios que otorgan a la sociedad desde el punto de vista hidrológico —captación y almacenamiento de agua; minimización de ciclos de inundación y sequía; control de la erosión y sedimento en los cuerpos de agua; calidad de agua; regulación del clima a escalas locales y regionales (Emerton & Boss, 2004; Manson, 2004)—, siguen siendo sujetos a dimensiones alarmantes de deforestación. Se debe resaltar que el informe principal de la evaluación de los recursos forestales mundiales señala que la pérdida de superficie boscosa en México durante el periodo 2000-2010 ascendió a 195 mil hectáreas, siendo el cambio de uso de suelo de forestal a urbano y agrícola el primer factor implicado en la deforestación de sus bosques y selvas (FAO, 2011). En el caso particular de Veracruz, existen datos que señalan que durante el periodo 1993-2000 fue

la entidad que perdió el mayor porcentaje de vegetación natural (19%) (Semarnat, 2006b). Asimismo, durante el Tercer Congreso Mexicano de Ecología, efectuado en abril de 2011 en Veracruz, se dijo que la entidad había perdido más del 80% de su cobertura vegetal original, y se subrayó que el foco rojo era la deforestación que se estaba dando en las partes altas de las cuencas, sobre todo en el Cofre de Perote y el Pico de Orizaba. Como resultado de esta pérdida de capital natural, aunado a condiciones de estiaje, la ciudad de Xalapa —abastecida en buena parte (40%) por el agua que se capta en la cuenca del río Pixquiac— ha debido enfrentar serios problemas de desabasto de agua, que han llevado a las autoridades a recurrir al tandeo (Contreras & Solano, 2010).

En contraste con este escenario, muchos especialistas opinan que los servicios ambientales o ecosistémicos son una de las razones más importantes para conservar los bosques o para administrarlos con más esmero. De hecho, el grado en que se mantienen los servicios ambientales forestales es uno de los criterios principales para distinguir entre los regímenes de administración más sustentables y los regímenes que no lo son (Higman, Bass, Judd, Mayers, & Nussbaum, 1999). Este reconocimiento ha llevado a desarrollar estrategias complementarias a las de la regulación del suelo y a las de restauración post-desastre para enfrentar con mayor éxito el reto de la conservación de los bosques (Landell-Mills & Porras, 2002). La valoración económica y la generación de mercados para los servicios ambientales que ofrecen los ecosistemas representan un ejemplo de este nuevo enfoque (Silva-Flores, Pérez-Verdín, & Navar-Cháidez, 2010).

El mercado de servicios ambientales o ecosistémicos se basa en el principio de que los proveedores de dichos servicios deben ser compensados económicamente por la sociedad que disfruta de los mismos, como una forma de conservar los ecosistemas donde éstos se generan. Por lo general, los propietarios de los ecosistemas no reciben una compensación

por los servicios ambientales que sus tierras proporcionan, así estos beneficios no son considerados a la hora de tomar decisiones acerca del uso de la tierra, reduciendo las probabilidades de que adopten prácticas productivas que generen beneficios para los ecosistemas. Al compensarlos por los servicios ambientales que su tierra suministra, es más probable que escojan un uso sustentable de la tierra (Landell-Mills & Porras, 2002). En teoría, esto conlleva la promoción de un uso más efectivo y sustentable de los recursos naturales, contribuyendo a invertir la tendencia a considerar el medio ambiente como “bien gratuito” (Cordero, 2003).

De acuerdo con la literatura, dicha alternativa se presume prometedora para los bosques, ya que el mercado de los servicios ambientales proporcionados por ellos está creciendo rápidamente gracias al fomento que las políticas nacionales y regionales le han dado, y también por la influencia de convenios y tratados internacionales, por ejemplo la Convención Marco sobre el Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto, la Convención sobre la Biodiversidad y Tratado de Libre Comercio de América del Norte en el caso de México (FAO, 2004). De hecho, algunos autores como Rosa *et al.* (2004) (citado en Silva-Flores, 2010) opinan que en el país existen condiciones favorables para el desarrollo de estas iniciativas, y ven como buenas oportunidades la captura de carbono, la diversidad genética, los atractivos naturales y el servicio ambiental hídrico. Asimismo, el Informe sobre la Propuesta de Pago por Servicios Ambientales (PSA) en México señala que existen tres consideraciones que sustentan una tendencia en favor de esta estrategia nacional de conservación, a saber: 1) México exhibe ventajas comparativas en cuanto a mercados internacionales en materia de biodiversidad, cobertura forestal (actual y deseada) y ecoturismo; 2) la vulnerabilidad climática, de acceso al agua y otros recursos representa un riesgo significativo nacional, anunciado por las organizaciones de la sociedad civil y la academia, y reconocido por el Estado;

3) la política socioeconómica mexicana se presta bien a soluciones de mercado como un complemento para enfrentar la problemática ambiental. Aunado a este ambiente propicio, la construcción de políticas para los mercados de servicios ecosistémicos encuentra sustento en un conjunto de instrumentos legales, que incluye el artículo 27 constitucional, la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, la Ley de la Vida Silvestre, la Ley de Bioseguridad, la Ley Forestal, la Ley Agraria, la Ley de Conservación de Suelos y la Ley del Agua.

En México, el mercado de servicios ambientales se adoptó formalmente como estrategia nacional en 2003, cuando se puso en marcha el Programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH), para atender áreas de importancia hidrológica estratégica (Corbera & González, 2007). Con este programa se busca proveer incentivos económicos a los usufructuarios, dueños o legítimos poseedores de terrenos con recursos forestales, para reducir la deforestación en áreas con problemas severos de abasto de agua causados por el cambio de uso de suelo (Semarnat, 2006a). No obstante, antes de estos programas, México ya había albergado algunas iniciativas de pago por servicios ambientales, incluyendo uno de los primeros proyectos de secuestro de carbono en el mundo y un esquema en el nivel de cuenca en el municipio de Coatepec, Veracruz, el cual fue uno de los primeros en Latinoamérica en establecer un fideicomiso, a través del cual los consumidores de agua compensaban a los manejadores del bosque por el mantenimiento de la cobertura forestal de la parte alta de la cuenca local (Corbera, González, & Brown, 2009).

En general, las opiniones sobre la efectividad de este tipo de esquemas para la conservación de los bosques y la promoción de la sustentabilidad son que ha tenido un alcance positivo aunque modesto. El Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval), por ejemplo, en su evaluación específica de desempeño 2008-2009, informó de una relación directa entre la reducción de

la deforestación y el otorgamiento de apoyos. Notificó también que los propietarios de dichos predios manifestaron que de no existir el programa de pago por servicios ambientales dedicarían sus terrenos a otro uso de suelo. En el mismo tenor, algunos autores reconocen el éxito en la aplicación de esta estrategia en varios casos, como en la comunidad de Puerto Bello Metzabok en Chiapas, el Sistema Comunitario para la Biodiversidad de Oaxaca, el Proyecto Fábricas del Agua Centro Sinaloa (Faces), la Reserva de la Biosfera Monarca, el proyecto Scolel Té en Chiapas y el caso del Mecanismo Local de Compensación por Servicios Ambientales en Quintana Roo, entre otros, en donde se realizan diversas acciones para la conservación de los ecosistemas y se generan beneficios monetarios para las comunidades (Chávez & Mancilla, 2013).

Por otro lado, se está de acuerdo en que esta clase de proyectos han generado otros tipos de beneficios, como el fortalecimiento del capital social de los grupos (entrenamiento, organización) para mejorar el manejo forestal; autonomía para la gestión de su territorio; el reconocimiento de derechos de uso y propiedad; la contribución de las reglas de su implementación para mejorar la vigilancia contra la tala ilegal, y la instrumentación de esquemas de financiamiento de largo plazo para la conservación de la biodiversidad de importancia global, tales como los Fondos Concurrentes y el Fondo Patrimonial de Biodiversidad (Corbera *et al.*, 2009). Sin embargo, autores como Muñoz-Piña, Guevara, Torres y Braña (2008), y García-Amado, Ruiz, Reyes, Barrasa y Contreras (2011) opinan que si bien este mecanismo es esperanzador, aún falta afinar su operación, para poder cumplir cabalmente con su objetivo. Por ello, es importante continuar trabajando en esta dirección, generando información a partir de casos de estudio, que permita entender más el tema de la provisión de agua ligada con la valoración cuantitativa de este servicio ambiental, sobre todo en el contexto nacional (Silva-Flores *et al.*, 2010).

Toda estimación del valor económico de los servicios ambientales implica la elección de un método. Los principales métodos de valoración entre los cuales se puede elegir se agrupan en distintas categorías: valoración a precios de mercado, incluyendo el costo de oportunidad; estimación de beneficios de consumo y producción de subsistencia; métodos de mercados sustitutos, incluyendo el modelo del costo de viaje, modelo hedónico y modelos de bienes sustitutos; métodos de la función de producción, los cuales se centran en relaciones biofísicas entre las funciones ambientales y las actividades de mercado; métodos de preferencias expresadas, principalmente el método de valoración contingente y sus variantes; y los métodos basados en costos, incluyendo el método de los costos de reposición y gastos defensivos (Dixon, Scura, Carpenter, & Sherman, 1994; Van den Bergh, 1996). En el caso de este trabajo, se eligió el *método de costo de oportunidad* para calcular el valor económico-ecológico de los bosques como captadores de agua, por su validez y aceptación teórica, sus requerimientos de información y la facilidad de su empleo (Munasinghe & Lutz, 1993; Van den Bergh, 1996). En este método, el costo implica algo más que lo que es preciso pagar o sacrificar para obtener un bien o servicio, ya sea mediante la compra, el intercambio o la producción. Bajo este enfoque, si un consumidor paga una suma de dinero para recibir un bien, estará decidiendo, implícitamente, no destinar ese dinero a la compra de otros bienes que podrían darle mayor o menor satisfacción; si una empresa ocupa sus recursos en producir algo, pierde la oportunidad, obviamente, de dedicar esos mismos recursos a la creación de otros productos. De aquí surge un concepto central en la ciencia económica contemporánea: el *costo de oportunidad*, el cual se entiende como el beneficio que se sacrifica al no seguir en un curso alternativo de acción (Munasinghe & Lutz, 1993).

En el caso de los bienes o servicios intangibles, como el aire puro o la captación y almacenamiento de agua, el costo de

oportunidad se basa en la idea de que los costos de usar un recurso para propósitos que no tienen precios en el mercado o no son comercializados pueden ser estimados usando como variable *proxy* el ingreso perdido por no emplear el recurso en otros usos. Tal es el caso, por ejemplo, de preservar un área boscosa en vez de usarla para fines ganaderos. Los ingresos que se dejan de percibir en la actividad ganadera representan, en este caso, el costo de oportunidad del bosque. Así, en vez de valorar directamente los beneficios del bosque, se estiman los ingresos dejados de ganar por preservar el área, con lo cual se puede asignar un valor a esa alternativa de uso. El costo de oportunidad es considerado entonces como el costo de la preservación (Barrantes & Castro, 2002).

Ejemplos de trabajos latinoamericanos que han abordado este enfoque para la valoración del servicio hídrico de los bosques son el de Cordero-Camacho (2001), quien desarrolló un esquema de cobro y pago por servicio ambiental hídrico en la provincia de Heredia, Costa Rica; el de Hernández, Cobos y Ortiz (2002), quienes desarrollaron una valoración ambiental de la regulación hídrica en la Reserva de la Biosfera la Sierra en Guatemala; el de Barzev (2004), quien hizo una valoración económica de la oferta y demanda hídrica de la fuente en donde nace el río Chiquito, en Honduras, y el de Bastidas (2009), quien hizo una valoración económica de la regulación hídrica del bosque en una cuenca del río Gaucha, en Colombia. En el caso de México, se registra una escasa publicación de trabajos sobre este tema, pero se recupera el de la delegación de Semarnat en Querétaro, que se enfocó en hacer un estudio prospectivo en los municipios de Landa de Matamoros y Amealco en 2002 (Fregoso, 2006); el de Coila (2005), sobre la valoración económica del servicio ambiental hídrico de los bosques de la subcuenca del río Santa Catarina, y el de Silva-Flores *et al.* (2010), con el mismo propósito, en El Salto, Pueblo Nuevo, Durango.

En tal contexto, el objetivo de este trabajo es construir una tarifa hídrica que pueda ser

aplicada a los usuarios del agua, con el fin de recuperar el monto equivalente que se ganaría con la principal actividad productiva que compite con la conservación del bosque, y usarla como compensación para que se deje de practicar. De esta manera, se avanza sobre el posible empleo de un instrumento financiero en la gestión integral del agua en la cuenca del río Pixquiac, tal y como se propone en el “enfoque suave” de la gestión del agua propuesto por Brandes, Ferguson, M’gonigle y Sandborn (2005).

El área de estudio

La cuenca del río Pixquiac se encuentra en el estado de Veracruz, México. Se ubica al oeste de la ciudad de Xalapa y al noroeste de Coatepec, entre las coordenadas UTM 2148010.5 y 2164990.5 latitud norte, y 694007.18 y 72049.18 longitud oeste. La variación altitudinal va desde los 1 040 hasta los 3 800 msnm (ver figura 1). Desde el punto de vista hidrológico, esta cuenca pertenece a la región hidrológica número 28 del río Papaloapan y forma parte de la cuenca río Lerma La Antigua (Manson, 2007). La cuenca del río Pixquiac tiene una superficie aproximada de 10 303.53 hectáreas y una longitud de 30.72 km. Comprende parte de los municipios de Acajete (11.64%), Coatepec (1.25%), Las Vigas de Ramírez (48.75%), Tlanehuayocan (6.52%), Perote (28.02%) y Xico (3.79%).

El área de interés para la realización del presente estudio se ubica en la parte alta de la cuenca, cuya superficie asciende a unas 7 371.99 hectáreas. La cuenca alta corresponde a las áreas montañosas o cabeceras de los cerros, limitados en su parte superior por las líneas divisorias de aguas. Es llamada también zona de cabecera donde nacen las corrientes hidrológicas y su función principal es la captación de agua (Paldeyra, 2003, citado en García, Martínez, & Vidriales, 2008), de aquí que el presente estudio se restrinja a esta zona.

Por su localización, esta cuenca se encuentra catalogada como una de las fuentes

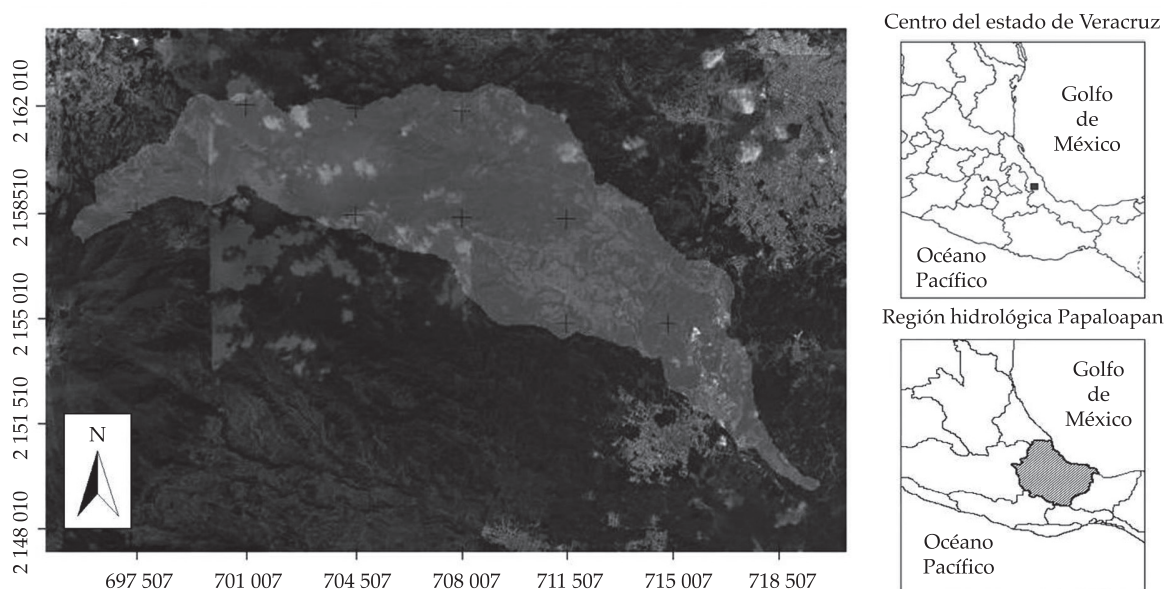


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca del río Pixquiac.

de abastecimiento de agua más importantes para la región de Xalapa y sus alrededores, además de ser un sistema hidrológico cuyo potencial puede ser inagotable si se le procura el cuidado y manejo adecuados. Es por eso que la conservación de su parte alta cobra especial importancia y justifica estudios como éste. Además, vale la pena mencionar que el sitio alberga una gran variedad de flora y fauna, constituyendo uno de los entornos ecológicos más significativos de la región, lo cual refuerza el interés por dicho sitio (García-Calva, 2010).

Metodología

Desde la perspectiva del proceso de diseño y puesta en práctica de sistemas de pago por servicios de agua, este estudio de caso se concentró en los dos primeros aspectos propuestos por Pagiola (2002): la identificación y cuantificación de los servicios hídricos que genera el bosque de la cuenca alta del río Pixquiac y el cálculo del cargo que debe cobrarse a los usuarios del agua después de internalizar la dimensión ambiental.

Desde el punto de vista metodológico, el primer aspecto se abordó tomando como referencia el modelo de Barrantes y Castro (2002) para la valoración del recurso hídrico proporcionado por los bosques, el cual está basado en el costo de oportunidad del uso del suelo. Este modelo considera que dicha valoración (VB) debe incluir dos rubros: el valor o costo de captación de agua de los bosques (VC) y el valor o costo de recuperación de suelos dedicados a la ganadería o descubiertos (VR). Es decir:

$$VB = VC + VR \quad (1)$$

El costo de captación VC en $[\$/m^3]$ se calcula de la siguiente manera:

$$VC = \frac{\alpha B A b}{O_c} (1 + \beta) \quad (2)$$

Donde α es la importancia relativa del bosque en función del recurso hídrico que provee (valor adimensional entre 0 = sin importancia y 1 = máxima importancia); B es

el costo de oportunidad del bosque *versus* la ganadería [\$/ (ha x año)]; Ab es el área cubierta por bosque en el área de estudio (ha); Oc es el volumen de agua captada por el área boscosa dentro de la región de estudio ($m^3/año$), y β es la valoración de la calidad del agua de escorrentía captada por dicho bosque (valor adimensional entre 0 = muy mala y 1 = muy buena).

El costo de recuperación VR en [\$/ m^3] es igual a:

$$VR = \frac{\alpha C Ar}{Oc} \quad (3)$$

Donde α es la importancia relativa del bosque en función del recurso hídrico que provee (valor adimensional entre 0 = sin importancia y 1 = máxima importancia); C es el costo para la actividad destinada a la recuperación del bosque dentro del área de estudio [\$/ (ha x año)]; Ar es la superficie a recuperar en el área de estudio (ha); Oc es el volumen de agua captada por el área boscosa dentro de la región de estudio ($m^3/año$).

La metodología de Barrantes y Castro (2002) considera un periodo de cinco años para el establecimiento y manejo inicial de los bosques. Siguiendo las recomendaciones de Silva-Flores *et al.* (2010), para este estudio se consideró un horizonte de 10 años, incluido su establecimiento, para estimar el valor de recuperación total.

El área ocupada por suelo forestal y la superficie a recuperar se calcularon a partir de la elaboración de un mapa de vegetación y uso de suelo, utilizando tecnologías de percepción remota y sistemas de información geográfica.

La importancia del bosque en función del recurso hídrico se determinó mediante la aplicación de una encuesta a un total de 60 titulares de tomas domésticas que se abastecen del agua que provee el área de estudio, quienes opinaron sobre la relevancia del bosque para captar agua, así como sobre la calidad de agua recibida. La encuesta se aplicó bajo un esquema de muestreo estratificado y considerando preguntas cerradas. El tamaño de la muestra

obedeció al alcance del criterio de saturación de las respuestas (Serbia, 2007). Las respuestas de los encuestados sobre estos dos aspectos fueron medidas con una escala que va del 1 al 10 y se integraron, respectivamente, mediante el cálculo de la media. Por último, los valores promedio (α y β) se normalizaron para obtener cifras entre 0 y 1.

Por otro lado, se identificó a la ganadería como la actividad responsable del cambio de uso de suelo de bosque a pasto (INEGI, 2012). Siguiendo la sugerencia del INE (2002), el costo de oportunidad de la actividad ganadera se calculó como la rentabilidad de la actividad pecuaria a partir de la producción de carne en canal en vez de la producción ganadera. Esto debido a que es posible asumir que los rendimientos de la carne vendida en canal incluyen (descontados) los costos de producción por unidad animal. Es preciso mencionar que las dos grandes fuentes de producción de carne en canal del estado de Veracruz son las de ganado bovino y ovino (INEGI, 2012), razón por la cual se tomaron en cuenta ambos valores de producción.

El método consistió en extraer de las fuentes documentales de INEGI los valores de la producción de carne en canal tanto de bovinos (VPB) como de ovinos (VPO), para cada uno de los municipios que confluyen en el área de estudio, así como la superficie dedicada a la ganadería en cada uno de ellos (SG). Se calcularon también, a partir de la información de sensores remotos, las superficies de cada municipio que, estando dentro del área de estudio, se dedicaban a la agricultura (SAEG). Después se sumaron, para cada municipio, los valores de la producción de carne en canal de ambos tipos de ganado, para obtener el valor acumulado de esta variable (VAP). Estos valores acumulados se dividieron, respectivamente, entre la superficie municipal dedicada a la agricultura, para con ello obtener el valor del rendimiento de la producción por municipio (RP). Como la información de INEGI es agregada por municipio y se requería tener un valor representativo del costo de

oportunidad para toda el área de estudio, se calculó la media del rendimiento de la producción por municipio, ponderado por la superficie municipal que, perteneciendo al área de estudio, se dedicaba a la ganadería.

Siguiendo las recomendaciones de Silva-Flores *et al.* (2010), el volumen de agua captada por los bosques insertos en el área de estudio se estimó multiplicando la captación neta en la cuenca por un factor de ajuste que resulta de dividir la superficie boscosa del área de estudio entre la superficie de la cuenca. El valor de la captación neta anual se tomó del trabajo desarrollado por García *et al.* (2008), como parte del estudio integral de esta cuenca.

Finalmente, para llevar a cabo el cálculo de las nuevas tarifas, se obtuvo el monto del cobro actual por el servicio de agua potable en la zona de estudio y se sumó el valor del recurso hídrico proporcionado por los bosques (VB) a dicha tarifa.

Resultados

La cobertura del suelo

El mapa de uso de suelos y vegetación producido incluyó cinco categorías: 1) áreas de cultivo; 2) pastizal; 3) suelo descubierto; 4) bosque de coníferas; 5) bosque de pino-encino. Dado que la parte boscosa media-alta de la cuenca constituye el área de interés desde el punto de vista hidrológico, el mapa de cobertura y uso de suelo que abarcaba originalmente toda la cuenca se recortó a partir de los 2 100 msnm hacia arriba. El área correspondiente a cada uno de estas coberturas se muestra en el cuadro 1. Como puede observarse, la cobertura más abundante corresponde a la del bosque de coníferas, con 2 846.7 ha, equivalente al 71.8% del área de estudio. En contraste, la menos abundante es la de bosque de pino-encino, con una cobertura del 1.15% del área de estudio, lo que equivale a 45.72 hectáreas.

La superficie del bosque de coníferas que resulta de este cálculo, más la correspondiente a la categoría bosque de pino-encino (2 982.42

Cuadro 1. Cobertura para cada categoría de uso de suelo (ha).

Uso de suelo	Cobertura (ha)
Áreas de cultivo	199.17
Pastizal	271.26
Suelo descubierto	601.38
Bosque de coníferas	2 846.70
Bosque de pino-encino	45.72
Total	3 964.23

Fuente: elaboración propia.

ha), fue la que se tomó como referencia para calcular el valor de captación de agua por parte del bosque. En el caso del valor de recuperación, la superficie que se tomó como área a recuperar fue el resultado de la suma de las superficies de los pastizales y de suelo descubierto (872.64 ha).

El volumen de captación de agua

De acuerdo con García *et al.* (2008) y Ballesteros (2010), la captación neta de la cuenca asciende a 145 430 260 (m³/año). La proporción de área boscosa en el área de estudio, con respecto al total del área de la cuenca fue de $0.29 = 2\,982.42/10\,303.53$, por lo que la cantidad de agua que capta el bosque en cuestión es de $42\,174\,775.4 \text{ (m}^3/\text{año)} = 145\,430\,260.0 * 0.29$.

Estimación del índice de importancia que los usuarios le otorgan al bosque, relacionado en función de la captación y calidad del agua

Los resultados indican que 79.17% de los encuestados le asigna una calificación de 10 a la importancia del bosque en función del recurso hídrico, mientras que el 20.80% le asigna el valor de 9. De acuerdo con las recomendaciones de Cochran (1977), se calculó la media de las calificaciones como medida representativa de los datos y, normalizándola, se determinó que el valor de este servicio para los usuarios es de 0.97. Este porcentaje representa la porción del costo de oportunidad que debe ser compensado por los usuarios del agua a los propietarios de la

tierra que se involucren en tareas de protección y recuperación del bosque. La otra proporción (0.021), se puede atribuir a otros servicios del bosque, como recreación o fijación de carbono. En el caso del valor que los usuarios le dan a la calidad del agua de escorrentía, los valores indican que el 12.5% de los encuestados le asigna un valor de 6 a la calidad del agua, el 16.6% un valor de 8, el 25% un valor de 9 y el 48.5% una calificación de 10. En síntesis, la calificación promedio que los usuarios le dan a la calidad del agua de escorrentía fue de 0.89.

Estimación del costo de oportunidad del bosque versus la actividad ganadera

Los resultados obtenidos para la estimación del costo de oportunidad, así como los datos que se utilizaron para calcularlo, se muestran en el cuadro 2. Como se observa en este cuadro, el costo de oportunidad del uso de suelo forestal asciende a 2 059.76 \$/ (ha x año).

Estimación de los costos por actividades de restauración y reforestación para la rehabilitación de la cuenca

Como se ilustra en el cuadro 3, el costo total de esta actividad es de \$17 300.56/ha para un ecosistema templado frío de acuerdo con los datos establecidos por la Comisión Nacional Forestal (DOF, 2011) y su ajuste, considerando un 4.05% de inflación. El egreso en el primer año asciende a 84.69% del total, equivalente a \$14 652.1/ha. En los nueve años subsecuentes, los costos se reducen a un monto fijo de \$2 648.44/ha, asociado con el mantenimiento de la superficie forestal.

Cálculo de los valores de captación y recuperación en la cuenca

Sustituyendo valores en la ecuación (2), se tiene que el valor de captación asciende a \$0.266/m³, como se ilustra a continuación:

$$VC = \left(\frac{(0.97)(2\,059.76)(2\,982.42)}{42\,174\,775.4} \right) * (1 + 0.89) = 0.266$$

Haciendo sustitución de valores en la ecuación (3), se tiene que el valor de recuperación para el primer año es de \$0.294/m³, mientras que para los años 2 a 10 asciende a sólo \$0.053/m³, tal y como se muestra en seguida:

$$VR[1] = \left(\frac{(0.97)(14\,652.1)(872.64)}{42\,174\,775.4} \right) = 0.294$$

$$VR[2-10] = \left(\frac{(0.97)(2\,648.44)(872.64)}{42\,174\,775.4} \right) = 0.053$$

Utilizando la ecuación (1) y sustituyendo valores, se tiene que el valor del bosque en el primer año suma \$0.560/m³ y para los siguientes nueve años \$0.319/m³, tal como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$VB[1] = VC + VR[1] = 0.266 + 0.294 = 0.560 \text{ $/m}^3$$

$$VB[2-10] = VC + VR[2-10] = 0.266 + 0.053 = 0.319 \text{ $/m}^3$$

Tarifa hídrica ajustada ambientalmente

El nuevo modelo tarifario propuesto se muestra en los cuadros 4 y 5, en los cuales se contrastan los valores de las tarifas cobradas actualmente y las tarifas que se sugieren después de aplicar el valor del bosque para el primer año y los nueve siguientes. La nueva tarifa se ajusta de acuerdo con el rango de consumo, siguiendo el criterio que el organismo operador del agua aplica para cobrar el uso del recurso.

Esta tarifa hídrica ajustada ambientalmente constituye el mecanismo con el que se cobraría a los usuarios para compensar a los dueños de la tierra para que se responsabilicen de proteger y recuperar el bosque, para que cumpla con sus funciones hídricas. De esta manera se considera al bosque como un productor de servicios ambientales, cuya rentabilidad puede ser igual

Cuadro 2. Estimación del costo de oportunidad del uso de suelo forestal.

Municipio	Valor de la producción de carne en canal de bovinos VPB \$/año	Valor de la producción de carne en canal de ovinos VPO \$/año	Valor acumulado de la producción de carne en canal VPB + VPO \$/año	Superficie dedicada a la ganadería SG ha	Rendimiento de la producción de carne en canal $RP = (VPB + VPO) / SG$ \$/año x ha	Superficie municipal que pertenece al área de estudio y que está dedicada a la ganadería (SMAEG) ha	$(RP \times SMAEG)$ \$/año	Promedio ponderado del rendimiento de la producción o costo de oportunidad (total de $RP \times SMAEG$) \$/año x ha
Acajete	13 502 000	1 224 000	14 726 000	2 990	4 925.08	1 019.59	5 021 562.31	
Coatepec	7 863 000	1 709 000	9 572 000	3 647	2 624.62	1 714.09	4 498 834.89	
Las Vigas de Ramírez	9 811 000	899 000	10 710 000	1 168	9 169.52	1.168	10 709.99	10 425 617.55 / 5 061.55
Perote	2 974 000	4 084 000	7 058 000	20 862	338.31	2 211.37	748 128.58	
Tlalnehuayocan	0	892 000	892 000	511	1 745.59	35.25	61 532.04	
Xico	4 327 000	4 158 000	8 485 000	8 009	1 059.43	80.09	84 849.74	
Totales							10 425 617.55	2 059.76

Fuente: elaboración propia a partir de datos de INEGI (2012).

Cuadro 3. Costo de referencia para la reforestación o restauración y su mantenimiento.

Tipo de actividad	Unidad de medida	Costo (\$)
Costo por restauración de suelos	Hectárea	9 669.15
Costo por reforestación	Hectárea	4 982.95
Costo por mantenimiento	Hectárea	2 648.44
Costo total	Hectárea	17 300.56

Fuente: elaboración propia a partir de los datos del DOF (2011).

Cuadro 4. Tarifas del servicio de agua potable (2013) y su comparación con las tarifas que incluyen el valor del bosque (VB), correspondientes al primer año.

Rango de consumo en m³/mes	Popular sin el VB incluido	Popular con el VB incluido	Interés social sin el VB incluido	Interés social con el VB incluido	Doméstico medio sin el VB incluido	Doméstico medio con el VB incluido	Residencial sin el VB incluido	Residencial con el VB incluido
(0-10)	46.71	46.71	66.80	66.8	84.69	84.69	100.12	100.12
(11-20)	4.70	5.26	6.72	7.28	9.03	9.59	10.90	11.46
(21-30)	5.25	5.81	7.02	7.58	9.24	9.8	11.22	11.78
(31-40)	5.39	5.95	7.41	7.97	9.53	10.09	11.58	12.14
(41-60)	5.76	6.32	7.71	8.27	10.03	10.59	12.24	12.8
(61-80)	6.11	6.67	8.97	9.53	10.70	11.26	12.99	13.55
(81-100)	6.47	7.03	9.61	10.17	11.98	12.54	14.63	15.19
(101-120)	7.35	7.91	9.85	10.41	12.34	12.9	15.08	15.64
(121-150)	7.90	8.46	10.73	11.29	13.33	13.89	16.27	16.83
(151-200)	8.93	9.49	11.98	12.54	14.98	15.54	18.23	18.79

Fuente: elaboración propia a partir de datos de la Comisión Municipal de Agua Potable y Saneamiento de Xalapa (2013). Las celdas en gris oscuro representan la tarifa base para cada tipo de usuario, considerando un consumo máximo de 10 m³. El resto de las casillas se refiere al costo del consumo extra expresado en (\$/m³), cuyo valor se ajusta de acuerdo con el rango de consumo y tipo de usuario.

Cuadro 5. Tarifas del servicio de agua potable (2013) y su comparación con las tarifas que incluyen el valor del bosque (VB), correspondiente a los años 2 a 10.

Rango de consumo en m³/mes	Popular sin el VB incluido	Popular con el VB incluido	Interés social sin el VB incluido	Interés social con el VB incluido	Doméstico medio sin el VB incluido	Doméstico medio con el VB incluido	Residencial sin el VB incluido	Residencial con el VB incluido
(0-10)	46.71	46.71	66.80	66.8	84.69	84.69	100.12	100.12
(11-20)	4.70	5.019	6.72	7.03	9.03	9.34	10.90	11.21
(21-30)	5.25	5.569	7.02	7.33	9.24	9.55	11.22	11.53
(31-40)	5.39	5.709	7.41	7.72	9.53	9.84	11.58	11.89
(41-60)	5.76	6.079	7.71	8.029	10.03	10.34	12.24	12.55
(61-80)	6.11	6.429	8.97	9.28	10.70	11.01	12.99	13.30
(81-100)	6.47	6.789	9.61	9.92	11.98	12.29	14.63	14.94
(101-120)	7.35	7.669	9.85	10.16	12.34	12.65	15.08	15.39
(121-150)	7.90	8.219	10.73	11.04	13.33	13.64	16.27	16.58
(151-200)	8.93	9.249	11.98	12.29	14.98	15.29	18.23	18.54

Fuente: elaboración propia a partir de datos de la Comisión Municipal de Agua Potable y Saneamiento de Xalapa (2013). Las celdas en gris oscuro representan la tarifa base para cada tipo de usuario, considerando un consumo máximo de 10 m³. El resto de las casillas se refiere al costo del consumo extra expresado en (\$/m³), cuyo valor se ajusta de acuerdo con el rango de consumo y tipo de usuario.

o más atractiva que la de los usos tradicionales del suelo, como el ganadero, en el caso que nos ocupa.

Discusión

Para tener una idea del impacto económico de la tarifa ajustada ambientalmente sobre el ingreso familiar, se hizo una comparación entre el pago actual y el pago sugerido. Para contextualizar esta comparación se obtuvo el monto actual del salario mínimo en la zona de estudio, así como la distribución de salarios por estrato social.

De acuerdo con datos para 2013 de la Comisión Nacional de Salarios Mínimos, la zona de estudio se encuentra en el área geográfica "B", donde el valor de un salario mínimo diario es de \$61.38 (\$1 841.40 mensual) (STPS-Conasami, 2013). Por otro lado, la Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo (STPS-INEGI, 2013) indica que el estrato social alto percibe más de cinco salarios mínimos (más de \$9 207.00 al mes), la clase media entre dos y cinco salarios mínimos (de \$3 682.00 a \$9 207.00 al mes), y el estrato social bajo percibe de cero hasta dos salarios mínimos (de \$0.00 a \$3 682.00).

Tomando como referencia esta información y los datos sobre dotaciones de agua de Ochoa, Rodríguez y Delgado (1993), podemos decir que, en el caso del estrato social bajo, al cual se le adjudica un consumo de agua que oscila entre los 70 y 172 m³ al año, el pago sugerido siempre es menor al 3.8% del salario anual, equivalente a \$833.76/año; para la clase media, a la cual se le adjudica un consumo entre los 182 y 355 m³ al año, la tarifa anual máxima significa menos del 7.5% del ingreso anual (\$3 269.52); mientras que para el estrato alto, el cual consume entre 273 y 456 m³, no supera el 4.8% del ingreso anual, equivalente a \$5 280.48/año. Esto implica pagar un máximo de \$2.28 por un consumo diario de 471.23 litros por toma para el estrato popular, un máximo de \$8.95 al día consumiendo 972.6 litros por toma para el estrato doméstico medio, y un

máximo de \$14.46 diarios consumiendo 1 249.31 litros por toma en el caso del estrato medio-alto (residencial). Este análisis sugiere que, en principio, la tarifa sería asequible para todos aquellos que por lo menos ganan un salario mínimo, considerando, por ejemplo, lo que se puede gastar diariamente en bebidas embotelladas (un refresco de 600 ml tiene un costo de \$9.00 (Anguiano & Mendoza, 2013) y una botella de agua de 1 000 ml cuesta alrededor de \$10.00). Estos resultados sugieren que el impacto al consumidor del recurso, generado por los nuevos componentes ambientales, es relativamente bajo, contrario al supuesto común de que elevan de modo significativo los montos de las tarifas, restando con ello competitividad a los instrumentos económicos, para favorecer la conservación de los servicios ecosistémicos (Bastidas, 2009).

No obstante, en el caso que nos ocupa, es importante apuntar que si bien el aumento en relación con el porcentaje de ingresos mensuales más considerable no se da en el estrato bajo, se debe tener en mente que dichos ingresos podrían estar muy por debajo del salario mínimo, circunstancia por la cual la disponibilidad de pago podría ser negativa y con razón. Bajo este panorama y desde la perspectiva de la sustentabilidad, deberá tener prioridad sobre el establecimiento de una tarifa, que el gobierno garantice a los usuarios el suministro necesario para satisfacer las necesidades mínimas de supervivencia, establecida en 50 l/hab/día (Glieck, 2001). Esto es de suma importancia, dado que, citando a Tello (2006): "el acceso al agua potable se traduce en aspectos fundamentales para la vida y en factores indispensables en el ámbito del desarrollo social, ya que implica notables mejoras en las condiciones de vida de las personas, que se advierten en los ámbitos económico, social y cultural".

Por otro lado, aunque la incorporación del valor del bosque a la tarifa pueda significar un adelanto para la valoración de los servicios ecosistémicos y su mantenimiento, se observó que el esquema de tarifas utilizado por el

organismo operador del agua requiere un ajuste. Esto en virtud de que, haciendo un experimento, suponiendo un consumo de 355 m³/año tanto para usuarios del tipo doméstico medio como residencial, se encontró que a los primeros les cuesta más, en relación con su salario, consumir esa cantidad de agua que a los segundos (3 y 2.95%, respectivamente). Y esto considerando tan sólo la posibilidad de que el usuario residencial ganara un salario mínimo más que la categoría superior del salario de un usuario doméstico medio. Cuando se consideraron dos salarios mínimos por arriba, el porcentaje para el usuario residencial disminuyó a 2.5%. Esto nos alerta sobre las limitantes de usar como base del cobro de los servicios hidrológicos del bosque el esquema tarifario del organismo operador. También sobre la importancia de cuidar los aspectos de equidad en el establecimiento y cobro de tarifas (Brandes *et al.*, 2005).

En este sentido, es necesario resaltar que la aplicabilidad de la tarifa dependerá de la voluntad de pago de los usuarios del agua y de su nivel de ingresos. De aquí se deriva la necesidad de complementar esta investigación con un estudio de valoración contingente, en la cual se determine el monto que los usuarios estarían dispuestos a pagar por seguir contando con agua suficiente en calidad y cantidad para satisfacer sus necesidades reales (Barrantes & Castro, 2002). Al respecto, dos estudios que han abordado en el contexto nacional la disposición a pagar (DAP) por los servicios hidrológicos que aportan los bosques muestran un marcado contraste en las cantidades reveladas. En un caso, los usuarios están dispuestos a pagar \$29.76/año (López-Paniagua, 2007) y, en el otro, \$216.16/año (Silva-Flores, 2010). Para el caso de los usuarios del agua en la cuenca del Pixquiac, la primera es una cantidad que, de aceptarse como viable, sería muy cercana a la que se requeriría que el estrato popular pagase anualmente en el caso del consumo mínimo para mantener a la cuenca como captadora y almacenadora de agua, situación que la vuelve insuficiente, considerando que el nivel

de consumo popular no refleja el consumo real del agua en la cuenca. En contraste, la segunda cantidad sería más que suficiente para compensar a los propietarios y evitar el cambio de uso de suelo forestal. Sin embargo, esto implicaría cobrarles a los usuarios domésticos, sin distinción, un consumo muy por arriba del que en realidad hacen, agravándose la situación en los estratos populares. Es claro entonces que debe tenerse mucho cuidado en querer extrapolar los resultados de otros estudios a los lugares o regiones, ya que provienen de características biofísicas, sociales y económicas específicas de un área de estudio. No obstante, es importante continuar con este tipo de investigaciones en el país si se quiere seguir fomentando la estrategia del PSA para desestimular el fenómeno de la deforestación y, en consecuencia, mejorar las capacidades de la regulación hidrológica de nuestras cuencas (Silva-Flores *et al.*, 2010).

El contraste entre la tarifa que se derivó de este estudio y el monto que los usuarios estuvieran dispuestos a pagar podría conducir a una decisión de compromiso entre ambas cantidades, con la idea de ir introduciendo estos mecanismos de manera paulatina, para ir creando una cultura de pago por los servicios que brinda el bosque. Ante esta perspectiva, habría que cuidar además que el mecanismo de cobro de la tarifa y el destino final de lo recaudado esté bajo un esquema de transparencia y efectividad; de no ser así, la política se volvería inútil (Merino, 2005). No hay que perder de vista tampoco que la voluntad de pago estará ligada con la oportunidad — en tiempo y forma— y calidad con que los usuarios reciban el recurso. De aquí que se deba continuar con las soluciones de infraestructura para la distribución oportuna en tiempo y forma, como un mecanismo complementario a los de índole financiera para la gestión del agua (Brandes *et al.*, 2005; Marañón-Herrera, Chávez-Cortés, Martínez-Espinosa, & Ruelas-Monjardin, 2008).

Por otro lado, es evidente que el precio del mercado de la actividad que compite con la conservación del bosque es un factor

determinante en la factibilidad de la aplicación de una tarifa hídrica, ya que no es lo mismo el rendimiento de la actividad forestal que el de la agrícola, por poner un ejemplo. En circunstancias como ésta, sería necesario complementar el nivel de ingresos de los poseedores del bosque más allá del cobro de tarifas, tal vez a través de la actividad cinegética o del turismo en contacto con la naturaleza, en la cual el bosque actúa como soporte para el hábitat de especies y para los servicios ecosistémicos ligados con la recreación, educación y cultura. Otras alternativas serían complementar los ingresos de los propietarios de los bosques a través del manejo forestal comunitario (MFC) (Merino, 2005) y los programas de servicios ambientales, como captura de carbono, producción de agua y conservación de la biodiversidad propuestos por el Estado (Silva-Flores, 2010).

Desde el punto de vista metodológico, es claro que el instrumento utilizado, por estar basado en el costo de oportunidad y valores revelados, acusa una alta dependencia de la dinámica del mercado y de la opinión de un colectivo. De ahí que la reproductibilidad de la medida calculada aquí no aplique para contextos diferentes: lugar, tiempo, condiciones, tipo y número de usuarios, por lo cual deberá ser tomada con cautela. No obstante, conserva su valor, ya que permite al menos lograr unos valores aproximativos que hacen visible la utilidad económica del patrimonio forestal de la cuenca alta como un medio para buscar su sostenibilidad a largo plazo (Aguilera, 2006). Asimismo, los valores del bosque obtenidos constituyen una primera aproximación y pueden ser utilizados como referencia para futuros análisis de este tipo en la cuenca del Pixquiac.

Finalmente, a partir de este trabajo de investigación, se hace evidente la necesidad e importancia que el recurso agua tiene para los usuarios de la cuenca del río Pixquiac y, por ende, de la relevancia que implica la elaboración y aplicación de políticas de gestión ambiental, en especial de políticas de gestión hídrica. Para ello, es necesario que exista un

compromiso real, así como un vínculo entre las autoridades ambientales estatales y los diferentes actores sociales (Brandes *et al.*, 2005). De forma complementaria, se requiere de un amplio esfuerzo por parte de ambas partes para destacar la importancia de la educación y sensibilización de la población en materia del manejo del agua, así como de los recursos naturales de la zona en que habitan (López-Paniagua, 2007).

Conclusiones

Se cumplió con el objetivo general de la investigación, el cual consistía en construir una tarifa hídrica que pudiera ser aplicada a los usuarios domésticos del agua, con el fin de recuperar el monto equivalente que se ganaría con la principal actividad productiva que compite con la conservación del bosque y usarla como compensación para que se deje de practicar.

El precio del mercado de la actividad que compite con la conservación del bosque es un factor determinante en la factibilidad de la aplicación de una tarifa hídrica, por lo que es importante considerar en la propuesta de manejo otras actividades que completen los ingresos de los dueños de los bosques.

Estudios de esta índole deberán complementarse con otros de valoración contingente para atender la viabilidad de la aplicación de la tarifa hídrica. Debe resaltarse además que es necesario continuar este tipo de estudios para analizar e incorporar a la construcción de una tarifa otros servicios aportados por el bosque.

Es sabido que la aplicación repentina y estandarizada de reglas para motivar un cambio en los patrones de comportamiento de las personas no es aceptada, lo cual puede llevar al fracaso de las iniciativas. Es por ello que en este caso es importante considerar la conveniencia de la aplicación paulatina y ajustada de una tarifa hídrica. Asimismo, la transparencia en la recolección y aplicación de fondos será vital para el éxito de cualquier política de pago por servicios ambientales.

Las experiencias obtenidas de las investigaciones realizadas en Costa Rica y en otras zonas han demostrado que los PSA han ejercido un papel importante en la conservación de ecosistemas y han logrado detener su degradación. Es así como la adaptabilidad del sistema a diferentes contextos y servicios ambientales hacen que los programas de PSA puedan ser aplicados a una gran cantidad de situaciones en todo el país. En este sentido, se espera que los resultados de esta investigación sirvan de base para discusiones en materia de conservación de bosques y el mantenimiento de los servicios ambientales que éstos proveen.

Agradecimientos

Agradecemos a los revisores sus valiosos comentarios y sugerencias para mejorar este documento.

Referencias

- Aguilera, U. D. (2006). El valor económico del medio ambiente. *Ecosistemas*, 15(2), 66-71.
- Anguiano, D., & Mendoza, A. (2013). *Suben el precio de los refrescos de Coca-Cola* [en línea]. Ciudad de México. Milenio-Negocios. Consultado el 26/05/2013. Recuperado de <http://monterrey.milenio.com/cdb/doc/noticias2011/607e5689c02bb47f9d4ecb72088b911f>.
- Ballesteros, P. E. (2010). *Balance hídrico preliminar de la microcuenca del río Pixquiac* (46 pp.). Tesis para obtener la Especialidad en Diagnóstico y Gestión Ambiental. Veracruz, México: Universidad Veracruzana.
- Barrantes, G., & Castro, E. (2002). Experiencias replicables de valoración económica de bienes y servicios ambientales y establecimiento de sistemas de pago por servicios ambientales. Implementación de un esquema de cobro y pago por servicio ambiental hídrico: el caso de la empresa de servicios públicos de Heredia S.A. En R. Barsev (Ed.). *Guía metodológica para la valoración de bienes, servicios e impactos ambientales. Un aporte para la gestión de ecosistemas y recursos naturales en el CBM. Serie Técnica 04* (pp. 108-112) Managua, Nicaragua: Corredor Biológico Mesoamericano-CCAD-PNUM/GED.
- Barzev, R. (2004). *Estudio de la valoración económica de la oferta y demanda hídrica del bosque en que nace la fuente del río Chiquito (Finca El Cacao-Achuapa), Nicaragua-Implementación de mecanismos de pagos por servicios hídricos* [en línea]. Managua, Nicaragua. Pasolac. consultado el 10/10/2013. Recuperado de http://201.116.60.96:8080/wb/ceaaa/ficha_de_estudio_economico?id=298.
- Bastidas, P. D. (2009). *Valoración económica del servicio ambiental de regulación hídrica del bosque de roble en la cuenca del río Guacha, Encino-Santander, Colombia* (85 pp.). Tesis para obtener el grado de maestro. Asunción, Paraguay: Universidad Nacional de Asunción.
- Brandes, O. M., Ferguson, K., M'gonigle, M., & Sandborn, C. (2005). *At a Watershed: Ecological Governance and Sustainable Water Management in Canada* [en línea]. Victoria, Canada. The POLIS Project on Ecological Governance, University of Victoria. Consultada el 30/08/2013. Recuperado de <https://www.google.com/#q=at+a+watershed>.
- Cochran, W. (1977). *Sampling Techniques*. Third Edition (150 pp.) New York, USA: John Wiley and Sons.
- Coila, Y. (2005). *Valoración económica del servicio ambiental hídrico de los bosques de la subcuenca del río Santa Catarina, México* [en línea]. Boletín de la Fundación Equitas, Santiago, Chile. MERCOSUR/GMCRES N° 80/962005. Consultado el 30/09/2013. Recuperado de www.boletin.fundacionequitas.org/11/11.13.htm.
- Contreras, T. C., & Solano, C. F. A. (2010). *Caracterización del agua pluvial en el periodo de verano para su uso doméstico en Xalapa, Veracruz* (71 pp.). Tesis para obtener el grado de especialista en Diagnóstico y Gestión Ambiental. Xalapa, México: Universidad Veracruzana.
- Comisión Municipal de Agua Potable y Saneamiento de Xalapa (2013). *Tarifas para el cobro de agua potable del mes de septiembre* [en línea]. Xalapa, México. CMAS. Consultado el 25/09/2013. Recuperado de www.aguaxalapa.gob.mx.
- Corbera, E., & González, C. (2007). *Pago por servicios ambientales en México: situación actual y objetivos de futuro* (95 pp.). Memoria del taller. México, DF: Instituto Nacional de Ecología.
- Corbera, S., González, S. C., & Brown, K. (2009). Institutional Dimensions of Payment for Ecosystem Services: An Analysis of México's Carbon Forestry Program. *Ecological Economics*, 68, 743-761.
- Cordero, D. (2003). *Lineamientos para la formulación de una estrategia para la sostenibilidad financiera del programa PROCUENCAS de la ESPH S.A. bajo un modelo de inversión ambiental compartida* (76 pp.). Heredia, Costa Rica: Escuela de Ciencias Forestales, Universidad Nacional.
- Cordero-Camacho, D. (2001). *PROCUENCAS, un esquema de cobro y pago por servicio ambiental hídrico en la Provincia de Heredia, Costa Rica* [en línea]. Heredia, Costa Rica. Empresa de Servicios Públicos de Heredia. Consultado el 2/09/2013. Recuperado de http://www.undp.org/cu/eventos/aprotegidas/Pago_Serv_Amb_Agua_D_Cordero_Heredia.pdf.
- Chávez, C. M. M. (2007). Usos y abusos del agua. *Ciencias*, 85, 30-36.
- Chávez, C. M. M., & Mancilla, H. K. E. (2013). El pago por servicios ambientales y la conservación de los bosques. *ContactoS*, 88, 27-35.

- DOF (febrero de 2011). *Acuerdo por el cual se emiten los costos de referencia para reforestación o restauración y su mantenimiento para compensación ambiental por cambio de uso de suelo en terrenos forestales y la metodología de su estimación*. México, DF: Diario Oficial de la Federación.
- Dixon, J., Scura, L. F., Carpenter, R. A., & Sherman, P. B. (1994). *Análisis económico de impactos ambientales* (249 pp.). Traducción de Tomás Saravi A. Segunda edición. Turrialba, Costa Rica: CATIE, Unidad de Producción de Medios.
- Emerton, L. & Bos, E. (2004). *Valor. Considerar a los ecosistemas como un componente económico de la infraestructura hídrica* (94 pp.). Traducción de José M. Blanch. San José, Costa Rica: UICN-ORMA.
- FAO (2004). *Payment Schemes for Environmental Services in Watersheds* [en línea]. Arequipa, Perú. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Land and Water Discussion Paper 3, Regional Forum. Consultado el 1/10/2013. Recuperado de ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/twdp3_es.pdf.
- FAO (2011). *Situación de los bosques del mundo 2011* (190 pp.). Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Fregoso, A. (2006). La oferta y el pago de los servicios ambientales hídricos: una comparación de diversos estudios. *Gaceta Ecológica*, 78, 29-46.
- García, C. I., Martínez, O. A., & Vidriales, C. G. (2008). *Balance hídrico de la cuenca del río Pixquiac*. (31 pp.). Documento Técnico del Proyecto NCMA 3-08-03. Delimitación de zonas prioritarias y evaluación de los mecanismos existentes para el pago de servicios ambientales hidrológicos en la cuenca del río Pixquiac, Veracruz, México. Xalapa, México: Senderos y Encuentros para un Desarrollo Autónomo Sustentable, A.C.
- García-Amado, L. R., Ruiz, P. M., Reyes, E. F., Barrasa, G. S., & Contreras, M. E. (2011). Efficiency of Payments for Environmental Services: Equity and Additionality in a Case Study from Biosphere Reserve in Chiapas, México. *Ecological Economics*, 70, 2361-2368.
- García-Calva, L. (2010). *Ordenamiento territorial de la subcuenca del río Pixquiac, Ver., a partir de la identificación de áreas ecológicamente sensibles* (110 pp.). Tesis para obtener el grado de Biólogo. México, DF: Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco.
- Glieck, P. H. (February, 2001). Safeguarding our Water. Making Every Drop Count. *Scientific American*, 284(2), 40-45.
- Hernández, O., Cobos, C., & Ortiz, A. (2002). *Valoración económica del servicio ambiental de regulación hídrica. Lado sur de la reserva de la Sierra de las Minas Guatemala* [en línea]. Guatemala, Guatemala: FIPA/AID-USAID. Consultado el 7/10/2013]. Recuperado de ftp://pdf.usaid.gov/pdf_docs/pnacx128.pdf.
- Higman, S., Bass, S., Judd, N., Mayers, J., & Nussbaum, R. (1999). *The Sustainable Forestry Handbook* (231 pp.). London: Earthscan.
- INE (2002). *Estimación del costo de oportunidad del uso de suelo forestal en ejidos a nivel nacional* (13 pp.). México, DF: Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Ecología, Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- INEGI (2012). *Anuario Estadístico Veracruz* (500 pp.). México: Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.
- Landell-Mills, N., & Porras, I. (2002). *Silver Bullets or Fools' Gold? A Global Review of Markets for Forest Environmental Services and their Impacts on the Poor. Instruments for Sustainable Private Sector Forestry Series* (75 pp.). London: International Institute for Environment and Development.
- López-Paniagua, C. (2007). *Estudio de mercado del servicio ambiental hidrológico en la cuenca de Tatalpa Jalisco* [en línea]. Tesis para obtener el grado de maestro. Texcoco, México. Colegio de Postgraduados (COLPOS). Consultado el 2/10/2013. Recuperado de <http://www.biblio.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/1606>.
- Manson, R. H. (2004). Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques en México. *Madera y Bosques*, 10(1), 3-20.
- Manson, H. R. (2007). *Efectos del uso de suelo sobre la provisión de servicios ambientales hidrológicos: monitoreo del impacto del pago por servicios ambientales hidrológicos (PSAH)* (14 pp.). México, DF: Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Marañón-Herrera, S., Chávez-Cortés, J. M., Martínez-Espinosa, D., & Ruelas-Monjardín, L. C. (2008). Los modelos de manejo del agua y su influencia en las políticas de los procesos acuícolas. Estudio de caso. La piscicultura de ornato en el estado de Morelos, México. *Ingeniería hidráulica en México*, 23(4), 145-159.
- MEA (2007). *Millenium Ecosystem Assessment: A Toolkit for Understanding and Action. Protecting Nature's Services. Protecting Ourselves* (28 pp.). Washington. DC: Island Press.
- Merino, P. L. (enero-marzo, 2005). El desarrollo institucional de esquema de pago por servicios ambientales. *Gaceta Ecológica*, 74, 29-42.
- Munasinghe, M., & Lutz, E. (1993). Environmental Economics and Valuation in Development Decision Making. En M. Munasinghe (Ed.). *Environmental Economics and Natural Resource Management in Developing Countries* (560 pp.). Washington, DC: The World Bank.
- Muñoz-Piña, C., Guevara, A., Torres, J. M., & Braña, J. (2008). Paying for the Hydrological Services of Mexico's Forest: Analysis, Negotiations and Results. *Ecological Economics*, 65(4), 725-736.
- Ochoa, A. L., Rodríguez, V. M., & Delgado, B. A. (1993). *Análisis de la información del estudio de actualización de dotaciones del país* (20 pp.) Jiutepec, México: IMTA, 1983.

- Pagiola, S. (2002). Paying for Water Services in Central America: Learning from Costa Rica. En S. Pagiola, J., Bishop, & N. Landell-Mills (Eds.). *Selling Forest Environmental Services: Market-based Mechanisms for Conservation and Development* (pp. 40-63). London: Earthscan.
- Serbia, J. M. (2007). Diseño, muestreo y análisis en la investigación cualitativa. *Hologramática* (año 4), 3(7), 123-146.
- Ramírez-Chasco, F., Cabrejas-Palacios, J., Seco-Meneses, A., & Torres-Escribano, J. L. (2004). El valor ecológico de los medios fluviales urbanos. *Ingeniería hidráulica en México*, 19(4), 21-32.
- Semarnat (2006a). *Introducción a los servicios ambientales* (73 pp.). México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Semarnat (2006b). *El medio ambiente en México 2005: en resumen* (91 pp.). México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-United Nations Development Programme.
- Silva-Flores, R., Pérez-Verdín, G., & Navar-Cháidez, J. J. (2010). Valoración económica de los servicios ambientales hidrológicos en El Salto, Pueblo Nuevo, Durango. *Madera y Bosques*, 16(1), 31-49.
- STPS-Conasami (2013). *Nuevos salarios mínimos 2013, por área geográfica generales y profesionales* [en línea]. México, DF: Secretaría del Trabajo y Previsión Social-Comisión Nacional de Salarios Mínimos. Consultado el 23/10/2013. Recuperado de http://www.conasami.gob.mx/nvos_sal_2013.html.
- STPS-INEGI (2013). *Encuesta nacional de Ocupación y Empleo* (10 pp.). México, DF: Secretaría del Trabajo y Previsión Social-Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Tello, M. L. F. (2006). *El acceso al agua potable, ¿un derecho humano?* [en línea]. México, DF. *Revista Derechos Humanos México. Revista del Centro Nacional de Derechos Humanos*, 2. Consultado el 23/10/2013. Recuperado de <http://www.juridicas.unam.mx/publica/rev/indice.htm?r=derhumex&n=2>.
- Van Den Bergh, J. (1996). *Ecological Economics and Sustainable Development. Theory, Methods and Applications* (354 pp.). Cheltenham, UK: Edward Elgar.

Dirección institucional de los autores

Dra. Marta Magdalena Chávez Cortés
Biól. Karla Erika Mancilla Hernández

Laboratorio de Planeación Ambiental
Departamento El Hombre y su Ambiente
Universidad Autónoma Metropolitana, Xochimilco
Calzada del Hueso 100, Col. Villa Quietud, delegación Coyoacán
04960 México, D.F., MÉXICO
Teléfono: +52 (55) 54837 225
ccmm1320@correo.xoc.uam.mx
kalita280183@hotmail.com



Haga clic aquí para escribir al autor



Cascada Quetzalapan, ejido Tullimán, Puebla, México.

Foto: Álvaro Can Chulim.

Modelamiento matemático de caudales recesivos en la región mediterránea andina del Maule; el caso del estero Upeo, Chile

• Francisco Balocchi •
University of Arizona, USA

• Roberto Pizarro* • Carolina Morales •
Universidad de Talca, Chile

*Autor de correspondencia

• Claudio Olivares •
Ministerio de Obras Públicas, Chile

Resumen

Balocchi, F., Pizarro, R., Morales, C., & Olivares, C. (septiembre-octubre, 2014). Modelamiento matemático de caudales recesivos en la región mediterránea andina del Maule; el caso del estero Upeo, Chile. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(5), 179-188.

En el presente estudio se analizaron cuatro modelos matemáticos de estimación de caudales recesivos, con el fin de determinar cuál de ellos obtiene los mejores resultados en una cuenca andina del Maule, zona mediterránea de Chile central. Esto se realizó a través del análisis de 25 crecidas en la época estival 1971-2003, en donde se consideró el aporte exclusivo de las aguas subterráneas a partir del tercer punto de quiebre de la curva de bajada del hidrograma. Los resultados obtenidos demuestran que el modelo exponencial 3 es el que presenta las mejores estimaciones. En el caso del mejor lapso para el ajuste de los modelos, el tiempo de 240 horas es el que obtiene los mejores resultados, según el test de Bland y Altman.

Palabras clave: hidrograma, caudales recesivos, curva de bajada, modelos matemáticos.

Abstract

Balocchi, F., Pizarro, R., Morales, C., & Olivares, C. (September-October, 2014). *Mathematical Modeling of Recessive Flows in the Andean Mediterranean Region of Maule; Case Study of Estero Upeo, Chile*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(5), 179-188.

This study analyzed four mathematical models for recessive flow estimation in order to determine which one would provide the best results for an Andean basin in Maule, central Chile. This was accomplished through the analysis of 25 summer floods occurring between 1971 and 2003, which identified groundwater as the exclusive supply as of the third inflection point of the falling limb of the storm's hydrograph. The results indicate that the exponential model 3 provides the best estimates. According to the Bland and Altman agreement test, the best model adjustment period was 240 hours.

Keywords: Hydrograph, recessive flows, falling limb, mathematics models.

Recibido: 25/03/13

Aceptado: 19/03/14

Introducción

La predicción de los caudales recesivos es una metodología ampliamente usada en la planificación y en la investigación hidrológica (Smakhtin, 2001), por lo que se transforma en una importante herramienta hidrológica, especialmente en periodos estivales, ya que en esta época la población es alimentada por las reservas de la cuenca (Wittenberg, 1999).

Esta situación deriva en que el conocimiento adquirido sobre las reservas de agua de una cuenca es de vital importancia para el desarrollo humano y productivo de un país.

Es por esto que surge la necesidad de estimar la disponibilidad de este recurso para su utilización en los tiempos estivales. Así, la modelación matemática constituye una importante herramienta para el análisis y una mejor comprensión del comportamiento del

agua en estos periodos, considerando que tales modelos pueden estudiar el comportamiento de sistemas complejos ante situaciones difíciles de observar en la realidad (Sujono, Shikasho, & Hiramatsu, 2004). Estrela (1992) señala que los modelos matemáticos para estimar caudales constituyen una forma válida para resolver los problemas hídrico-teóricos y, además, son los que tienen un mayor sentido físico-hidrológico.

Por otra parte, Linsley, Kohler y Paulhus (1949), y Pizarro (1993) señalan que si se conoce la forma de la curva de recesión del hidrograma es factible calcular el flujo de corrientes durante lapsos de sequía o estiaje. Así, el hidrograma muestra el comportamiento de los caudales con respecto al tiempo, el cual está compuesto por una curva de concentración, una curva de descenso y una curva recesiva (Maidment, 1992; Pizarro, 1993; Aparicio, 2003; Bedient & Huber, 2002; Brodie, Hostetler, & Slatter, 2007). La curva recesiva es aquella donde el flujo proviene exclusivamente de aguas subterráneas y permite calcular la disponibilidad de agua en los periodos entre crecidas, lo cual es de particular importancia en los lapsos estivales. En la figura 1 se puede observar que la curva recesiva o de agotamiento comprende desde el punto C en adelante (Linsley *et al.*, 1949); para el caso del segundo punto de quiebre y el punto C', indica el inicio de los caudales recesivos, según la metodología del tercer punto de quiebre (Pizarro *et al.*, 2013), esta última

utilizada en el presente estudio. Lo anterior se debe a que al asumir el tercer punto de quiebre como inicio de la curva recesiva se adquiere una mejor estabilidad de los datos de caudal, reduciendo la variabilidad de los mismos, lo cual permite mejores niveles de ajuste.

La separación del hidrograma propuesta por Linsley *et al.* (1949) y corroborada por Pizarro (1993) es la más utilizada en Chile. Dicha separación consiste en dibujar la curva de bajada del hidrograma en un gráfico semilogarítmico, en donde el segundo punto de quiebre corresponde al punto de inicio del hidrograma, donde sólo existen aportes de los caudales recesivos (Vilaró, 1976; Bedient & Huber, 2002). Existe otro tipo de metodologías para la separación del hidrograma, como la de Bedient y Huber (2002), y la de Viessman y Lewis (2003), ofreciendo buenas aproximaciones, que en general no presentan variaciones de relevancia al momento de determinar el punto de inicio de los caudales recesivos (Ponce, 1989). En el ámbito académico, es la teoría de Hewlett y Hibbert (1967) la más aceptada respecto a la separación de hidrogramas. Esta metodología señala que el agua nueva de lluvia empuja el agua antigua del suelo y esta última sería la que se une al caudal superficial y/o subterráneo. Sin embargo, Brooks, Barnard, Coulombe y McDonnell (2009) demostraron que no necesariamente se cumple dicho comportamiento. Por último y para determinar el comportamiento de los diferentes modelos matemáticos recesivos, se optó por mantener de manera constante la metodología de separación de Linsley.

Considerando lo anterior y con base en el conocimiento adquirido de las curvas recesivas, se modeló el comportamiento en periodos estivales de los caudales subterráneos que afloran en el estero Upeo, río Lontué, Chile, con el fin de encontrar el modelo que mejor se ajuste a la zona del estudio. Esto, debido a la disminución de la disponibilidad hídrica en la zona mediterránea de Chile, en especial en época estival, lo que sumado a la determinación del modelo correcto en la cuenca en estudio,

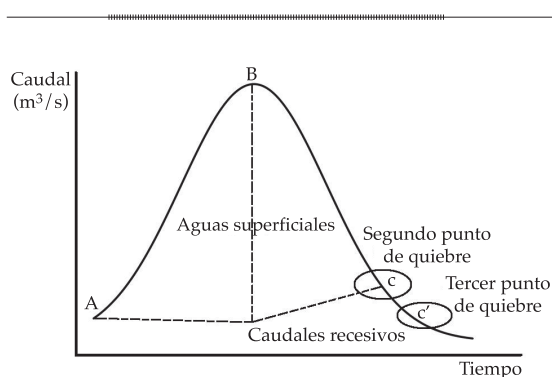


Figura 1. Hidrograma de crecida.

garantizaría una adecuada estimación de los caudales recesivos y el posterior cálculo de las reservas de la cuenca. Así, la estación utilizada en el presente estudio, estero Upeo en Upeo, está ubicada en la coordenada UTM 309 573 E – 6 105 697 N (WGS84/h19).

La zona de estudio (figura 2) posee una precipitación de 1 800 mm/año y corresponde a la subcuenca del río Lontué, ubicada entre 309 340 E – 6 095 942 N y 342 916 E – 6 114 754 N (WGS84/h19), abarcando una superficie de 2 784 km² que, en conjunto con el río Teno, ambos de régimen nivo pluvial y originados en la cordillera de los Andes, dan como origen al río Mataquito. El río Lontué recibe por su parte norte el aporte de dos esteros tributarios: Upeo y Chenquermo.

Las temperaturas registradas en dicha estación fluctúan entre los 20 y 4 °C. En cuanto a sus caudales, el máximo registrado en la estación corresponde a 490 m³/s en el año 2000.

El rasgo geomorfológico principal de la zona corresponde a la cordillera de los Andes. En cuanto a la geología, el tipo de roca

predominante es el paleozoico mesozoico y en algunos sectores el tipo cenozoico. Además, el sector se caracteriza por la presencia de sedimentos glaciares del tipo morrena (CNR, 1978).

Metodología

Para la selección de la estación, se tomó como base que ésta presentara un régimen natural de caudal, monitoreado por una estación fluviométrica que presentara un limnógrafo. La estación seleccionada posee datos desde 1964 hasta la fecha. Por tanto, se escogió la estación Estero Upeo, en Upeo, cuenca del Mataquito, región del Maule (figura 2).

Así, la información requerida consideró las curvas de descarga y los limnigramas desde 1964 hasta 2003, correspondientes a la Estación Estero Upeo, en Upeo, la cual fue proporcionada por la Dirección General de Aguas (DGA), institución oficial encargada de la administración y medición del recurso hídrico en Chile.

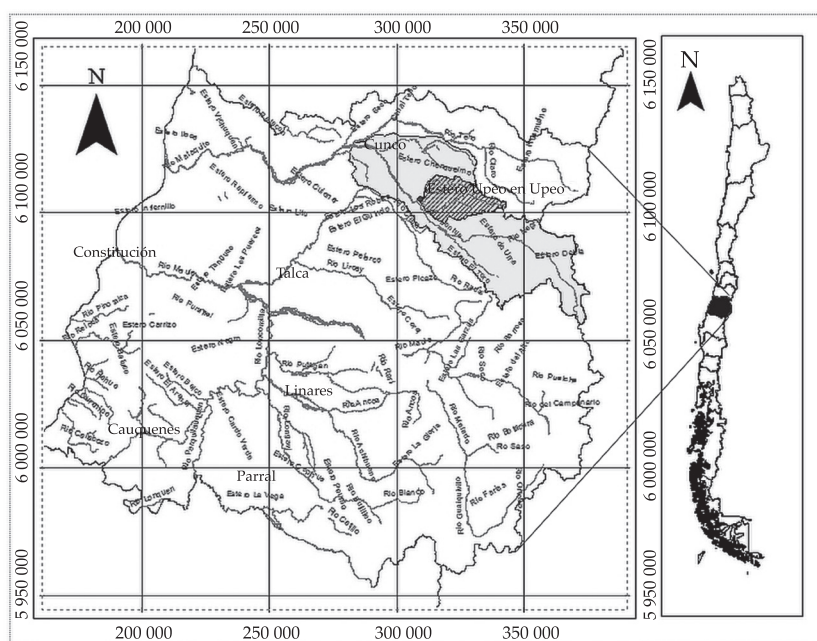


Figura 2. Ubicación de la zona de estudio.

Con la información recolectada se seleccionó el periodo que poseía crecidas que fuesen claramente identificables en época estival (octubre-abril). De acuerdo con esto, se seleccionaron 25 crecidas entre los años hidrológicos 1971-2003, con las que se procedió a construir el hidrograma de crecida de cada tormenta. Cabe recordar que se seleccionaron las últimas crecidas de cada año, casi al final del año hidrológico, con el fin de asegurar la presencia de caudales recesivos en lapsos importantes.

Los lapsos mencionados corresponden al tiempo que transcurre desde el inicio de un caudal recesivo (Q_0) y hasta el inicio de una nueva crecida. Además, estos lapsos son esenciales para el cálculo de los parámetros de los modelos utilizados. En este contexto, el menor periodo de crecida encontrado fue de 11 días y el máximo de 239 días.

En este contexto, el presente estudio consideró cinco lapsos correspondientes a 48 horas, 72 horas, 168 horas, 240 horas y el total de horas de cada crecida seleccionada, debido a que existe la hipótesis de que a mayor tiempo transcurrido desde la coordenada inicial (Q_0, t_0), el ajuste de cada modelo debería ser de mejor calidad. Así, las coordenadas para el lapso $t = 48$ horas sería (Q_0, t_0), (Q_{48}, t_{48}); para $t = 72$ horas sería (Q_0, t_0), (Q_{72}, t_{72}), y así sucesivamente, para cada lapso escogido. No obstante, y por su representatividad en el estudio, sólo se consideraron los lapsos de 240 y el total de horas de cada crecida.

Por otra parte, los modelos matemáticos empleados correspondieron a cuatro tipos: uno potencial y tres exponenciales, en los cuales los parámetros utilizados son el caudal inicial (Q_0), el coeficiente de agotamiento (α), un parámetro particular (n) del modelo exponencial 2, la constante de Neper (e) y los tiempos t y t_0 donde t_0 corresponde al tiempo inicial de los modelos.

El ajuste de estos modelos se basa considerando el valor de caudal inicial de la recesión (Q_0), que se produce al tiempo $t_0 = 0$; ello involucra considerar uno o más puntos en

el instante $t_0 + dt$, que define otra coordenada Q_t , con lo cual es posible obtener los parámetros de la ecuación. Por ello es importante estudiar si el diferencial de tiempo incide en la calidad de predicción de los caudales recesivos. Con esto, los modelos empleados fueron:

$$\text{Modelo potencial: } Q(t) = Q_0(1 + \alpha \cdot t)^{-2} \quad (\text{Cirugeda, 1985}) \quad (1)$$

$$\text{Modelo exponencial 1: } Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\alpha(t-t_0)} \quad (\text{Remenieras, 1971}) \quad (2)$$

$$\text{Modelo exponencial 2: } Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\alpha(t-t_0)^n} \quad (\text{Cirugeda, 1985}) \quad (3)$$

$$\text{Modelo exponencial 3: } Q(t) = Q_0 \cdot e^{(-2\alpha t)} \quad (\text{elaboración propia}) \quad (4)$$

Para el caso del modelo exponencial 3, el cual se propone como un nuevo modelo para la zona en estudio, se generó de una serie de modelos construidos y simulados. Su determinación matemática fue la siguiente:

Se sabe que $\frac{dQ}{dt} < 0$ donde Q = caudal y t = tiempo

Si se asume que la variación de caudal en el tiempo es proporcional al mismo caudal e inversamente proporcional a la raíz del tiempo, se tiene:

$$\frac{dQ}{dt} = -\alpha \left(\frac{Q}{\sqrt{t}} \right) \text{ operando } \frac{dQ}{Q} = -\alpha \left(\frac{dt}{\sqrt{t}} \right)$$

Se sabe además que cuando $Q = Q_0$, se define que $t = 0 = t_0$. Integrando entre los límites t y t_0 se tiene:

$$\ln Q \int_{Q_0}^Q = -\alpha \sqrt{t} \int_{t_0}^t \text{ lo cual queda:}$$

$$\ln Q - \ln Q_0 = -2\alpha (\sqrt{t} - \sqrt{t_0}). \text{ Por ende:}$$

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{(-2\alpha \sqrt{t})}$$

Para determinar los parámetros de los modelos y así poder ajustar éstos a la curva

recesiva, el procedimiento implicó considerar una primera coordenada, que es la del inicio de los caudales recesivos (t_v , Q_0). Posteriormente se consideró una segunda coordenada, la cual permite calcular el coeficiente de agotamiento de los modelos. Sin embargo, el modelo exponencial 2 requiere considerar una tercera coordenada para satisfacer el sistema de ecuaciones.

La validación de los modelos se realizó a través de distintas pruebas e indicadores estadísticos no paramétricos. Esta etapa de validación estadística consideró los resultados de las 25 crecidas seleccionadas, para los cuatro modelos propuestos. En el marco descrito se utilizaron los siguientes indicadores y pruebas estadísticas:

a) Coeficiente de determinación (R^2)

Este coeficiente, también denominado Nash-Sutcliffe, determina qué proporción de la variación total de los caudales observados (variable independiente), es explicada por los caudales modelados (variable dependiente). La forma de determinarla es la siguiente:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad \begin{array}{l} y_i: \text{caudales observados} \\ \bar{y}_i: \text{promedio de los} \\ \text{caudales observados} \\ \hat{y}_i: \text{caudales modelados} \end{array} \quad (5)$$

b) Error estándar de estimación (EEE)

Determina la disparidad promedio entre los caudales observados y los estimados, donde los valores cercanos a 0 indican que el modelo hace una buena descripción de los caudales de acuerdo con la fórmula del indicador:

$$EEE = \sqrt{\frac{\sum (y - \hat{y})^2}{n-2}} \quad \begin{array}{l} y: \text{caudales observados} \\ \hat{y}: \text{caudales modelados} \\ n: \text{número de datos de} \\ \text{caudal} \end{array} \quad (6)$$

c) Prueba U de Mann-Whitney

Esta prueba determina si dos muestras independientes provienen de la misma población (Montgomery & Runger, 1996; Mendenhall & Sincich, 1997). Asimismo, al ser una prueba no paramétrica, no requiere de los supuestos de normalidad e igualdad de varianzas (Mason & Lind, 1995).

Se establecen la hipótesis nula y la hipótesis alternativa:

H_0 : las distribuciones de las variables R_1 y R_2 son idénticas.

H_a : las distribuciones de las variables R_1 y R_2 no son idénticas.

Donde R_1 corresponde a los datos reales y R_2 a los datos modelados:

$$Ua = (n_1 \cdot n_2) + \left(\frac{n_1 - n_2 + 1}{2} \right) - \sum R_1 \quad \text{estadístico} \\ \text{para muestras pequeñas } (n_1 \text{ y } n_2 < 25) \quad (7)$$

$$Z = \frac{\sum R_1 - \sum R_2 - \left[(n_1 - n_2) \cdot \left(\frac{n_1 + n_2 + 1}{2} \right) \right]}{\sqrt{n_1 \cdot n_2 \left(\frac{n_1 + n_2 + 1}{3} \right)}} \quad \text{estadístico} \\ \text{para muestras grandes } (n_1 \text{ y } n_2 > 25) \quad (8)$$

Donde:

n_1 : tamaño de la muestra R_1 ; n_2 : tamaño de la muestra R_2 ; $\sum R_1$: suma de los rangos para la muestra R_1 ; $\sum R_2$: suma de los rangos para la muestra R_2 .

Regla de decisión: se rechaza H_0 a un nivel de significancia α , si:

$$Z \geq |Z\alpha| \quad (9)$$

Donde $Z\alpha$: valor crítico obtenido de la tabla normal estándar, a un nivel de significancia de α del orden de 0.05 y 0.01.

d) Test de concordancia de Bland y Altman (ACBA)

Este test determina si los modelos de estimación concuerdan lo suficiente como para que puedan declararse intercambiables (Carrasco & Jover, 2004; Cox, 2006). En términos estadísticos, se procede a calcular las diferencias promedio (dp) entre el valor real y el estimado, cuya diferencia representa el error sistemático, mientras que la varianza de las diferencias (DS) mide la imprecisión. En este marco se establecen los límites de concordancia del 95% (Carrasco & Jover, 2004; Paradis, Lefebvre, Morin, & Gloaguen, 2010). Este límite está definido por la expresión:

$$LC = dp \pm 2 \cdot DS \quad (10)$$

Así, la relación valor real *versus* valor estimado con un dp en valor absoluto lo más

cercano a cero será la de mejor ajuste. Si llegase a existir una igualdad o una mínima diferencia del valor dp , el mejor ajuste corresponderá al que presente un menor valor DS y sus límites de concordancia serán más estrechos (Bland & Altman, 1999).

Resultados y discusión

A modo de ejemplo visual, en la figura 3 se presentan dos crecidas diferentes con sus respectivos modelos (ajustado para el total de datos) y caudales reales, con el fin de mostrar la alta variabilidad de los modelos.

En el cuadro 1 se muestran los coeficientes de agotamiento (α) promedio para los cuatro modelos propuestos para los cinco lapsos establecidos y para las 25 crecidas.

Del cuadro 1 se desprende que el valor del coeficiente de agotamiento va disminuyendo a medida que aumenta el tiempo de estimación

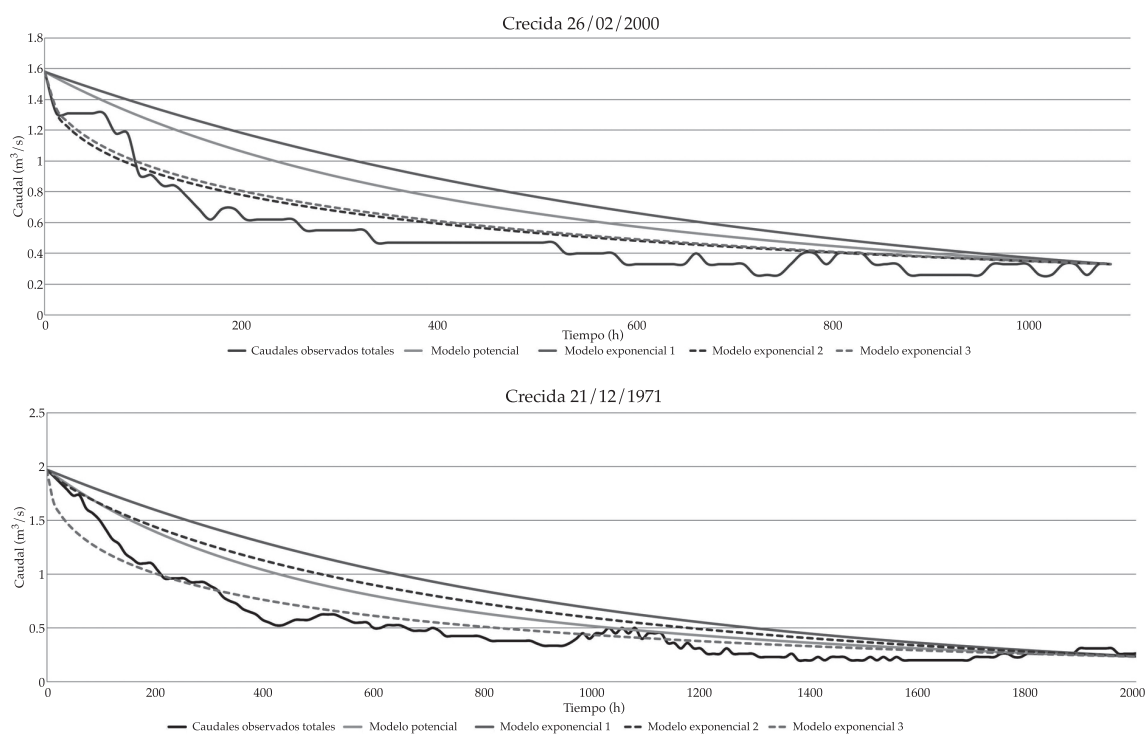


Figura 3. Ejemplo gráfico de dos crecidas con los cuatro modelos utilizados.

Cuadro 1. Coeficiente de agotamiento (α).

		α (240 h)	α total (*)
Modelo potencial	Promedio	0.0021	0.0012
	Coef. variación	0.7437	0.8070
Modelo exponencial 1	Promedio	0.0031	0.0015
	Coef. variación	0.6281	0.9102
Modelo exponencial 2	Promedio	0.0244	0.0224
	Coef. variación	0.6281	0.4604
Modelo exponencial 3	Promedio	0.0244	0.0224
	Coef. variación	0.6269	0.4601

(*) Considera la totalidad de datos con que se cuenta; α , coeficiente de agotamiento.

Cuadro 2. Resumen resultados test estadísticos R^2 , EEE y Mann-Whitney, aplicados a cada modelo.

Test	R^2		EEE		U Mann-Whitney	
Modelo	α (240 h)	α total (*)	α (240 h)	α total (*)	α (240 h)	α total (*)
Potencial	0.22	0.49	1.27	1.45	4%	20%
Exponencial 1	0.08	0.3	1.47	1.83	4%	20%
Exponencial 2	0.16	0.53	1.51	1.24	0%	32%
Exponencial 3	0.28	0.59	1.2	1.1	0%	44%

(*) Considera la totalidad de datos con que se cuenta; α , coeficiente de agotamiento.

debido a que al aumentar el tiempo de ajuste (diferencial) disminuye la pendiente entre el primer y el último punto.

Para el modelo exponencial 2, el coeficiente de agotamiento fue en aumento a medida que se incrementaron los tiempos de estimación. Esto se explica, ya que en su fórmula de cálculo, al estar elevado a "n" el tiempo t , amplifica el valor del mismo, siendo este modelo el que registró los valores más altos en sus coeficientes, en comparación con los otros tres modelos.

En cuanto al modelo exponencial 3, demostró una estabilidad en los valores del coeficiente, además de que es el modelo con el menor coeficiente de variación, situación que podría demostrar ser un buen modelo de ajuste.

Por otro lado y en relación con el parámetro "n" del modelo exponencial 2, los datos denotan un aumento a medida que se van incrementando los tiempos de estimación: 0.4834 para 240 horas y 0.4940 para el total de horas de la crecida (valores promedio). En este sentido, los resultados obtenidos concuerdan

con el comportamiento del parámetro α . Esto puede deberse a que al aumentar el parámetro "n", el coeficiente de agotamiento (α) también lo hace (por fórmula de cálculo).

En el cuadro 2 se presenta el resumen de los resultados del coeficiente de determinación (R^2) promedio, del error estándar de estimación promedio (EEE), del test U Mann-Whitney y del test de Bland-Altman para los cuatro modelos propuestos, para los dos lapsos considerados y para las 25 crecidas.

El cuadro 2 muestra que los mayores valores promedio de R^2 se encuentran concentrados en el total de datos. Esta situación podría deberse a que la fórmula de cálculo del R^2 es muy sensible a los cambios en el denominador. No obstante, los valores del coeficiente de determinación fueron muy bajos y no parecen representar de manera adecuada el comportamiento de los modelos matemáticos utilizados. Asimismo, y para el total de datos con que se cuenta, el modelo exponencial 3 obtiene el coeficiente más alto, aunque los valores son bajos en general. Por otro lado, el modelo potencial obtuvo los

mejores resultados de R^2 , seguido del modelo exponencial 3.

Para los modelos exponencial 1 y 2 se visualizan los coeficientes promedios más bajos y se observó una irregularidad en sus valores, no encontrándose una tendencia clara. Así, el modelo exponencial 1 fue el que obtuvo los valores más bajos del coeficiente de determinación, lo que señalaría que este modelo no parece ser adecuado para su uso.

Para el caso del EEE (cuadro 2), se puede observar que los menores valores promedio (el 80% de ellos) se concentran en el modelo exponencial 3. En cuanto al modelo exponencial 1, fue el que obtuvo los valores más altos del EEE, lo cual estaría demostrando que este modelo no representaría de forma fehaciente el comportamiento de los caudales recesivos de la cuenca en estudio.

También se puede comentar que los valores del EEE disminuyen a medida que aumentan los tiempos de estimación, con lo cual podría confirmarse la hipótesis de que a mayor tiempo transcurrido, mejor es el ajuste del modelo.

Los resultados obtenidos en el test U de Mann-Whitney, calculados con un nivel de significancia del 5% (cuadro 2), muestran que en el total de datos se concentra el mayor porcentaje de pruebas aprobadas, observándose que el modelo exponencial 3 es el que obtiene los mejores resultados, seguido muy de cerca por el modelo potencial. En cuanto al modelo

exponencial 1, de nuevo se descartó como predictor de caudales recesivos, al obtener los resultados menos satisfactorios en este test.

Por último, los bajos resultados obtenidos en la prueba U de Mann-Whitney pueden explicarse debido a que el nivel de significancia utilizado posee un área de aceptación pequeña, por lo que se convierte en una prueba muy estricta.

En el caso del test de Bland y Altman (ACBA), cabe señalar que se escogió teniendo en consideración el hecho de que tanto sus creadores como otros investigadores discrepan de la confiabilidad del coeficiente de determinación R^2 , ya que si dos instrumentos miden sistemáticamente cantidades diferentes uno del otro, la correlación puede ser perfecta, a pesar de que la concordancia sea nula (Pita & Pértegas, 1998).

En el cuadro 3 se encuentran los resultados obtenidos para las diferencias promedio (dp) y para la varianza de las diferencias (DS) en los cuatro modelos utilizados.

Según el cuadro 3 y observando las diferencias promedio, el mejor modelo es el exponencial 2, seguido del modelo exponencial 3. Sin embargo, al observar la desviación estándar de las diferencias promedio, es posible detectar una clara supremacía del modelo exponencial 3.

De nuevo se descarta como modelo predictor al modelo exponencial 1 debido a

Cuadro 3. Diferencias promedio (dp) y varianza de las diferencias (DS) para los cuatro modelos analizados.

Modelo	i	α (240 h)	α total (*)
Potencial	dp	0.637	-0.557
	DS	0.765	1.052
Exponencial 1	dp	0.903	-1.05
	DS	0.813	1.242
Exponencial 2	dp	0.149	-0.104
	DS	0.819	0.975
Exponencial 3	dp	0.187	0.035
	DS	0.758	0.912

(*) Considera la totalidad de datos con que se cuenta; α , coeficiente de agotamiento; i , indicador estadístico.

los malos resultados obtenidos tanto en las diferencias promedio como en la desviación estándar de la diferencias y en la totalidad de la validación estadística.

Con el fin de profundizar aún más en el análisis de los modelos, se procedió a hacer una comparación con los promedios reales de las crecidas. Para ello se realizó un cociente entre el error estándar de estimación y los caudales promedio reales para las 25 crecidas estimadas, situación que representa la proporción del error frente a los caudales reales. Es decir, los valores cercanos a 0 representan la menor proporción, siendo estos valores los que denotan el mejor ajuste. Esto se presenta a continuación en el cuadro 4.

Como se aprecia en el cuadro 4, fue el modelo exponencial 3 el que obtuvo los mejores resultados, es decir, el menor cociente entre el EEE y el promedio de los caudales observados.

Para el caso de los modelos restantes, el modelo exponencial 1 y 2 no obtuvieron resultados satisfactorios, siendo el modelo de peor calidad el modelo exponencial 1, corroborando nuevamente, no ser un modelo adecuado para la cuenca en estudio.

En relación con el lapso que dio los mejores resultados, en general fue el correspondiente al total de datos con que se cuenta. En contraparte, no existen evidencias notorias sobre si algún lapso en particular posee malos resultados según los estadísticos antes señalados. Sin embargo, al observar el test de Bland y Altman, es posible visualizar que el lapso con los mejores resultados fue el correspondiente a las 240 horas (10 días).

Conclusiones

La importancia de una correcta modelación de este tipo de caudales, en especial en zonas mediterráneas, áridas y semiáridas, hace a este tipo de estudios de vital importancia en la planificación en escenarios de eventos extremos, como lo es la escasez hídrica, pues permite calcular el volumen disponible luego de una crecida y regular el funcionamiento de un embalse, entre otras acciones.

De los resultados presentados se puede concluir que el modelo exponencial 3 obtuvo los mejores resultados para la estimación de caudales recesivos en la cuenca del estero Upeo, en Upeo, Chile.

En la determinación del mejor lapso para el cálculo del parámetro α , se puede desprender que, en general, correspondió al total de datos de cada crecida, lo que era previsible, obteniendo sustancialmente los mejores resultados. Sin embargo, para el test Bland y Altman, el mejor lapso a utilizar resultó ser el de 240 horas. Dada la reconocida potencia del test ACBA, se concluye que el mejor periodo de estimación es el correspondiente a 240 horas.

Finalmente, el modelo propuesto debiese responder al comportamiento de cauces y cuencas similares, y que en el caso de Chile son muchas las que comparten similares características geomorfológicas.

Referencias

Aparicio, F. (2003). *Fundamentos de hidrología de superficie* (303 pp.). México, DF: Editorial Limusa.

Cuadro 4. Cociente entre el EEE y el promedio de caudales observados de las crecidas seleccionadas.

Modelo	α (240 h)	α total (*)
Potencial	0.44	0.51
Exponencial 1	0.51	0.65
Exponencial 2	0.52	0.44
Exponencial 3	0.41	0.39

(*) Considera la totalidad de datos con que se cuenta; α , coeficiente de agotamiento.

- Bedient, P., & Huber, W. (2002). *Hidrology and Floodplain Analysis* (692 pp.). 3th. ed. New York: Addison-Wesley Pub. Co.
- Bland, J. M. & Altman, D. G. (1999). Measuring Agreement in Method Comparison Studies. *Statistical Methods in Medical Research*, 8, 135-160.
- Brodie, R., Hostetler, S., & Slatter, E. (2007). *Q-Lag: A New Hydrographic Approach to Understanding Stream-Aquifer Connectivity*. Canberra, Australy. Consultado el 12 de noviembre de 2007. Recuperado de <http://www.affashop.gov.au/PdfFiles/q-lag.pdf>.
- Brooks, J. R., Barnard, H. R., Coulombe, R., & McDonnell, J. J. (2009). Ecohydrologic Separation of Water between Trees and Streams in a Mediterranean Climate. *Nature Geoscience*, 3, 100-104.
- CNR (1978). *Estudio integral de riego de la cuenca del río Mataquito: prefactibilidad*. Santiago, Chile: Comisión Nacional de Riego.
- Carrasco, J., & Jover, L. (2004). Métodos estadísticos para evaluar la concordancia. *Med. Clin. (Barc.)*, 122(1), 28-34.
- Cirugeda, J. (1985). *Curso Internacional de Hidrología General y Aplicada* (pp. 66-77). Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Gabinete de Formación y Documentación.
- Cox, N. (2006). Assessing Agreement of Measurement and Predictions in Geomorphology. *Geomorphology*, 76(3-4), 332-346.
- Estrela, T. (1992). *Modelación matemática para la evaluación de los recursos hídricos* (55 pp.). Madrid: Centro de Estudios Hidrográficos, Ministerio de Obras Públicas.
- Hewlet, J. D., & Hibbert, A. R. (1967). Factors Affecting the Response of Small Watersheds to Precipitation in Humid Areas. *Progress in Physical Geography*, 33(2), 288-293.
- Linsley, R., Kohler, M., & Paulhus, J. (1949). *Applied Hydrology* (pp. 398-404). New York: McGraw Hill Civil Engineering Series.
- Maidment, D. (1992). *Handbook of Hydrology* (147 pp.). New York: McGraw-Hill, Inc.
- Mason, R. D., & Lind, D. A. (1995). *Estadística para administración y economía*. México, DF: Alfaomega.
- Mendenhall, W., & Sincich, T. (1997). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias* (1176 pp.). 4a. ed. México, DF: Prentice-Hall Hispanoamericana.
- Montgomery, D., & Runger, G. (1996). *Probabilidad y estadística aplicadas a la Ingeniería* (895 pp.) México, DF: Editorial McGraw-Hill.
- Paradis, D., Lefebvre, R., Morin, R., & Gloaguen, E. (2010). Permeability Profiles in Granular Aquifers Using Flowmeters in Direct-Push Wells. *Ground Water*, 49(4), 534-547.
- Pita, S., & Pértegas, S. (1998). *La fiabilidad de las mediciones clínicas, el análisis de concordancia para variables numéricas*. La Coruña, España: Unidad de Epidemiología Clínica y Bioestadística, Complejo Hospitalario-Universitario Juan Canalejo.
- Pizarro, R., Balocchi, F., Garcia, P., Macaya, K., Bro, P., León, L., Helwig, B., & Valdés, R. (2013). On Redefining the Onset of Base Flow Recessions on Storm Hydrographs. *Open Journal of Modern Hydrology*, 3, 269-277.
- Pizarro, R. (1993). *Elementos técnicos de hidrología III. Proyecto Regional mayor sobre el uso y conservación de recursos hídricos en áreas rurales de América Latina y el Caribe* (133 pp.). Talca, Chile: UNESCO-ORCYT, Uruguay, Ediciones Universidad de Talca.
- Ponce, V. (1989). *Engineering Hydrology, Principles and Practices* (640 pp.). New Jersey: Editorial Prentice-Hall.
- Remenieras, G. (1971). *Tratado de Hidrología Aplicada* (515 pp.). Madrid: Editores Asociados.
- Smakhtin, V. U. (2001). Estimating Continuous Monthly Base Flow Time Series and their Possible Applications in the Context of the Ecological Reserve. *Water SA*, 27(2), 213-217.
- Sujono, J., Shikasho, S., & Hiramatsu, K. (2004). A Comparison of Techniques for Hydrograph Recession Analysis. *Hydrological Processes*, 18, 403-413.
- Viessman, W., & Lewis, G. (2003). *Introduction to Hydrology* (612 pp). 5th edition. Englewood Cliffs, USA: Prentice Hall.
- Vilaró, F. (1976). *Elemento de hidrología de superficie. Hidrología subterránea* (385-398 pp.). Tomo I. Barcelona: Ediciones Omega S. A.
- Wittenberg, H. (1999). Base Flow Recession and Recharge as Nonlinear Storage Processes. *Hydrological Processes*, 13, 715-726.

Dirección institucional de los autores

Ing. Francisco Balocchi

University of Arizona
Department of Hydrology and Water Resources
1133 E James E. Rogers Way
Tucson, Arizona, USA
Teléfono: +1 (520) 6213 131
fbalocchi@email.arizona.edu

Ing. Francisco Balocchi

Dr. Roberto Pizarro
M.C. Carolina Morales

Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental
Universidad de Talca
Casilla 747
Talca, CHILE
Teléfono +56 (71) 2200 375
fbalocchi@utalca.cl
rpizarro@utalca.cl
camorales@utalca.cl

Ing. Claudio Olivares

Dirección General de Aguas
Ministerio de Obras Públicas
Riquelme 465
Block B, piso 3, Coyhaique
Teléfono +56 (67) 2572 266
claudio.olivares@mop.gov.cl



Haga clic aquí para escribir al autor

Evaluación de criterios de selección de modelos probabilísticos: validación con series de valores máximos simulados

• Roberto S. Flowers-Cano* • Robert Jeffrey Flowers • Fabián Rivera-Trejo •
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México

*Autor de correspondencia

Resumen

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

Se realizó un estudio de Monte Carlo para determinar la validez del empleo de la prueba del error estándar de ajuste como criterio de selección en el análisis de frecuencias. Dicho estadístico se comparó con los estadísticos de prueba de Kolmogorov-Smirnov, Cramer-Von Mises y Anderson-Darling. Las distribuciones elegidas para el propósito de comparar estos estadísticos fueron la gamma, Weibull, Gumbel, log-normal y log-logística. Los resultados obtenidos recomiendan el uso de muestras con tamaño de por lo menos $n = 50$ para tener un buen desempeño de las pruebas de Anderson-Darling y error estándar de ajuste. El empleo de las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Cramer-Von Mises no es del todo recomendable en hidrología, ya que para obtener un desempeño aceptable se necesitan muestras más grandes de las que normalmente se tienen en esta disciplina.

Palabras clave: error estándar de ajuste, Kolmogorov-Smirnov, Cramer-Von Mises, Anderson-Darling.

Abstract

Flowers-Cano, R. S., Flowers, R. J., & Rivera-Trejo, F. (September-October, 2014). *Evaluation of Probabilistic Model Selection Criteria: Validation with Series of Simulated Maxima*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(5), 189-197.

In this paper, a Monte Carlo study is performed to determine the validity of using the root mean square error as a selection criterion for the frequency analysis. This statistic is compared to those from the Kolmogorov-Smirnov, the Cramer-Von Mises and the Anderson-Darling tests. The distributions chosen to compare these statistics are gamma, Weibull, Gumbel, log-normal and log-logistic. The results obtained by this study indicate that at least 50 random observations are needed to obtain good results using either the Anderson-Darling or root mean square error statistics. The Kolmogorov-Smirnov and Cramer-Von Mises tests are not recommended since they require sample sizes larger than those usually found in hydrology.

Keywords: Root mean square error, Kolmogorov-Smirnov, Cramer-Von Mises, Anderson-Darling.

Recibido: 14/10/12

Aceptado: 12/02/14

Introducción

El diseño de obras de control y aprovechamiento requiere el análisis de frecuencias de eventos hidrológicos extremos para estimar la probabilidad de ocurrencia de dichos eventos. A menudo, el periodo de retorno del evento de diseño de una obra hidráulica excede el periodo de las observaciones y deben hacerse extrapolaciones a partir de los valores registrados. Una forma de extrapolar los datos históricos consiste en emplear el método gráfico, que requiere de un analista experimentado y

presenta la desventaja de la subjetividad. Una técnica más objetiva es encontrar la distribución de probabilidad teórica que se ajuste mejor a los datos medidos y usar esta función para la extrapolación. Algunas de las distribuciones de probabilidad usadas en hidrología son normal, log-normal, gamma, Gumbel, Weibull, Pearson tipo III y log-Pearson tipo III (Aksoy, 2000; Aparicio-Mijares, 2005). Un problema importante en el análisis de frecuencias es la selección de una distribución de probabilidad apropiada para los datos observados. Este problema no es exclusivo de la hidrología, también se

observa en otras áreas, como la confiabilidad y ciencias actuariales. Quesenberry y Kent (1982) desarrollaron un criterio de selección de distribuciones basado en estadísticos invariantes bajo transformaciones de escala. Demostraron la efectividad de su criterio a partir de un estudio de Monte Carlo para distinguir entre las distribuciones exponencial, gamma, Weibull y log-normal. Generalmente, la selección de modelos se basa en pruebas de bondad de ajuste, que incluyen métodos gráficos y estadísticos, siendo preferibles los métodos estadísticos por su objetividad (Shin, Jung, Jeong, & Heo, 2011). Entre los métodos estadísticos con mayor aplicación en la hidrología se encuentran las pruebas de chi-cuadrado (χ^2) y del error estándar de ajuste (EEA) (Ganancias-Martínez, 2009). Otros métodos usados a menudo son los de función de distribución empírica (FDE), que incluyen las pruebas de Kolmogorov-Smirnov (KS), Cramer-Von Mises (CVM) y Anderson-Darling (AD) (p. ej., Laio, 2004; Suhaila & Jemain, 2007; Dan'azumi, Shamsudin, & Aris, 2010; Shin *et al.*, 2011; Atroosh & Moustafa, 2012). Sin embargo, las pruebas estadísticas de bondad de ajuste tienen poco poder para rechazar distribuciones equivocadas (Mitosek, Strupczewski, & Singh, 2002), por lo que en muchos casos, más de una distribución puede ser aceptada por una prueba específica (Laio, Baldassarre, & Montanari, 2009). En este caso, el concepto de criterio de selección de modelos representa una alternativa a las pruebas de bondad de ajuste. Pueden definirse diversos criterios de selección en función de los estadísticos de bondad de ajuste antes mencionados. Otros criterios de selección se basan en la función de verosimilitud, como el criterio de información de Akaike (CIA) y el criterio de información Bayesiano (CIB) (Laio *et al.*, 2009). Balasooriya, Low y Wong (2005) evaluaron la efectividad de los criterios de Akaike, y de Quesenberry y Kent. Encontraron que si bien ambos criterios tuvieron un buen desempeño, el segundo fue ligeramente mejor; sin embargo, la dificultad computacional de este criterio hace preferible

el empleo del CIA. Los criterios de selección de modelos probabilísticos han recibido poca atención en la literatura hidrológica. Mitosek *et al.* (2002) consideraron las distribuciones Weibull, gamma, Gumbel y log-normal como modelos alternativos para la distribución de caudales pico anuales, y evaluaron estas distribuciones usando tres índices: la desviación absoluta media, la media cuadrática y la función de verosimilitud normalizada. Tras realizar un estudio de Monte Carlo, concluyeron que la función de verosimilitud normalizada representaba el mejor criterio de selección. El Adlouni, Bobée y Ouarda (2008) utilizaron técnicas gráficas para seleccionar la clase de distribuciones que proporciona el mejor ajuste a un conjunto de datos. Utilizaron el criterio de clasificación de Werner y Upper (2002), quienes dividieron las distribuciones en: a) estables; b) con cola tipo Parteo; c) regularmente variantes; d) sub-exponenciales; e) con momentos exponenciales inexistentes. Estos autores propusieron el empleo de métodos gráficos para determinar la clase de la distribución y después utilizar criterios como el CIA, CIB o AD para seleccionar la distribución de mejor ajuste. Por su parte, Laio *et al.* (2009) hicieron un análisis del desempeño de tres criterios de selección de modelos: CIA, CIB y AD, aplicados para identificar el mejor modelo probabilístico de un ajuste de datos hidrológicos extremos. El desempeño de estos criterios se comparó usando datos sintéticos. No hubo un claro ganador entre los tres, pero se observó que eran más efectivos cuando la distribución utilizada en la generación de los datos sintéticos era de dos parámetros y no de tres. Di Baldassarre, Laio y Montanari (2009) extendieron el análisis de Laio *et al.* (2009) y demostraron que el empleo de un criterio de selección de modelos mejora la estimación de la crecida de diseño de una obra hidráulica respecto al manejo de un modelo probabilístico fijo. En este trabajo se utilizó un procedimiento similar al de Laio *et al.* (2009). Se emplearon datos sintéticos de una distribución conocida para comparar el desempeño de diferentes

criterios de selección (AD, KS, CVM y del EEA); sin embargo, para mayor efectividad se emplearon solamente distribuciones de dos parámetros (Laio *et al.*, 2009; Haddad & Rahman, 2011; Markiewicz, Strupczewski, & Kochanek, 2010). La finalidad fue comparar el desempeño del EEA, recomendado por Aparicio-Mijares (2005), contra los otros criterios comúnmente utilizados en la estadística aplicada. Los resultados obtenidos muestran que el EEA tuvo un desempeño comparable al de la prueba de AD, y superior al de las pruebas de KS y CVM; además, se encontró que el empleo de estas dos últimas pruebas no es del todo recomendable en hidrología, pues para obtener desempeños aceptables se requieren muestras más grandes de las que normalmente se encuentran en esta disciplina.

Materiales y métodos

Comparación de criterios de selección

Se realizó un análisis numérico para comparar los desempeños de diferentes criterios de selección de modelos probabilísticos. Los criterios considerados fueron las pruebas de error estándar de ajuste (EEA), Cramer-Von Mises (CVM), Kolmogorov-Smirnov (KS) y Anderson-Darling (AD). El análisis se llevó a cabo por medio de una serie de experimentos de Monte Carlo, que constaron de los siguientes pasos: a) se eligieron las siguientes distribuciones de probabilidad madre: Gumbel, Weibull, gamma, log-normal y log-logística, las funciones de densidad de probabilidad (fdp) de las primeras cuatro distribuciones se pueden consultar en el texto de Haan (1994), la de la distribución log-logística, en Dey y Kundu (2009); b) se generaron 80 000 muestras aleatorias de tamaño n de las distribuciones madre, los tamaños de muestra considerados fueron $n = 30, 50, 80$ y 100 ; c) las distribuciones de interés se ajustaron a los datos generados, los parámetros se estimaron por el método de máxima verosimilitud; d) para cada una de las distribuciones se calcularon los estadísticos

de AD, CVM, KS y EEA; e) para cada uno de los criterios se seleccionó la distribución para la cual se obtuvo el valor más pequeño, si la distribución seleccionada era igual a la distribución madre, se consideró que el criterio tuvo éxito.

Parámetros de las distribuciones

Los parámetros de las distribuciones madre se muestran en el cuadro 1, dichos parámetros se basan en los estimados por De Dios-Lara (1998).

Métodos de selección de modelos

Los criterios de selección de modelos empleados en este trabajo se basan en el cálculo

Cuadro 1. Parámetros de las distribuciones usadas para generar los datos sintéticos. α : forma; β : escala; θ : ubicación.

Distribución	Parámetros	
	α	β
Gamma	6.17	12.75
	14.39	11.51
	12.42	13.56
	10.19	9.29
Weibull	α	β
	2.77	106.1
	4.03	152.8
	2.09	121.6
Gumbel	θ	β
	142.33	22.73
	157.20	43.48
	94.48	37.04
Log-normal	θ	β
	5.09	0.449
	4.80	0.356
	4.66	0.370
Log-logística	θ	β
	4.79	0.237
	4.91	0.280
	4.68	0.180
	4.66	0.303

de los estadísticos de EEA, KS, CVM y AD. La forma matemática del estadístico de EEA se puede consultar en Raynal-Villaseñor (2013). Para los otros estadísticos, se puede consultar Suhaila y Jemain (2007).

Estudio de sensibilidad

Se realizó un estudio de sensibilidad para determinar el efecto que tiene el empleo de un criterio de selección en la estimación del cuantil x_T , esto es, el valor asociado con un periodo de retorno T . Para dicho estudio se hicieron pruebas de Monte Carlo, estructuradas de la siguiente forma: a) se eligió como distribución madre una de las cinco distribuciones mencionadas anteriormente; b) se calculó el valor x_T de la distribución madre, correspondiente al periodo de retorno T . Los valores de T considerados fueron de 10 y 100 años, el primero representa una interpolación y el segundo una extrapolación; c) se generaron 400 000 muestras de tamaño n de las distribuciones madre, los tamaños de muestra considerados fueron $n = 30$ y $n = 50$, y se utilizaron los parámetros mostrados en el cuadro 1; d) las cinco distribuciones de interés se ajustaron a los datos de cada muestra, usando el método de máxima verosimilitud; e) se calcularon los valores de los criterios de AD, CVM, KS y EEA para cada una de las cinco distribuciones; f) para cada uno de los criterios se seleccionó la distribución para la cual se obtuvo el valor más pequeño; g) la distribución seleccionada por cada criterio se utilizó para calcular el estimador $\hat{x}_T$ de x_T ; h) para el conjunto de valores de ADx_T se calculó la raíz del error cuadrático medio relativo ($\delta RECM$) y el sesgo relativo (δS), empleando las siguientes expresiones (Markiewicz et al., 2010):

$$\delta RECM = \sqrt{\frac{E(\hat{x}_T - x_T)^2}{x_T}} \quad (1)$$

$$\delta S = \frac{E(\hat{x}_T - x_T)}{x_T} \quad (2)$$

donde x_T es el valor “verdadero” del cuantil, obtenido de la distribución madre; $\hat{x}_T$ es un estimador de x_T ; y E indica el valor esperado.

Resultados

Comparación de los criterios de selección

Los resultados se muestran en el cuadro 2. Se observan los porcentajes de selección correcta (PSC) para cada uno de los escenarios de simulación que se manejaron. El PSC es el número de veces que el criterio de selección identificó correctamente la distribución madre, dividido entre el número total de selecciones. Se analizaron las cinco distribuciones, por lo que el PSC asignado por azar sería del 20%. Por lo tanto, un criterio de selección bueno estaría por arriba del 20%. Se observa en el cuadro 2 que para una distribución madre y un juego de parámetros específicos, el PSC aumenta con n . También se distingue cierta preponderancia del criterio de AD cuando la distribución madre es log-normal, gamma o Weibull; del EEA cuando la distribución madre es Gumbel, y de CVM cuando la distribución madre es log-logística. Esto resulta más visible en la figura 1. En general, AD parece ser el criterio ganador, seguido por el EEA, mientras que KS parece tener el menor poder de selección. Algo más que se puede apreciar en esta figura es que el PSC no sólo varía en función del criterio de selección y de n , sino también de la distribución madre. Todos los criterios considerados presentan un mejor desempeño cuando la distribución madre es Weibull o log-logística que cuando es gamma, Gumbel, o log-normal. Esto se puede notar mejor en la figura 2.

Esto se debe a la dificultad de los mismos para discriminar entre distribuciones parecidas. Las PSC observadas dependen de las distribuciones que se someten a comparación. Si la distribución Weibull se hubiera sustituido por la log-gamma, los PSC observados para las otras distribuciones hubieran sido menores. Algo que se observa en el cuadro 2 y en las

Cuadro 2. Porcentajes de selección correcta (PSC) para diferentes distribuciones madre.

Distribución gamma																
Parámetros	EEA				KS				CVM				AD			
	<i>n</i> 30	<i>n</i> 50	<i>n</i> 80	<i>n</i> 100	<i>n</i> 30	<i>n</i> 50	<i>n</i> 80	<i>n</i> 100	<i>n</i> 30	<i>n</i> 50	<i>n</i> 80	<i>n</i> 100	<i>n</i> 30	<i>n</i> 50	<i>n</i> 80	<i>n</i> 100
$\alpha = 6.17$ $\beta = 12.75$	15.00	24.40	31.20	41.10	16.80	21.36	28.57	32.80	18.60	24.73	35.96	37.06	21.90	23.67	43.00	46.00
$\alpha = 14.39$ $\beta = 11.51$	14.50	27.20	39.40	45.00	14.89	22.80	29.40	34.70	17.08	27.07	32.97	38.86	20.60	32.80	42.70	48.00
$\alpha = 12.42$ $\beta = 13.56$	16.70	28.10	40.80	44.90	16.98	22.60	29.60	32.70	16.97	25.80	32.60	38.76	23.20	32.90	42.16	48.30
$\alpha = 10.19$ $\beta = 9.29$	17.00	28.50	40.50	45.10	20.40	22.26	29.24	34.13	20.48	25.87	33.40	40.80	25.87	32.30	43.30	50.40
Distribución Weibull																
$\alpha = 2.77$ $\beta = 106.1$	62.00	70.10	80.90	82.90	56.10	64.17	72.43	77.10	64.10	69.80	76.82	81.00	69.30	75.40	82.40	85.50
$\alpha = 4.03$ $\beta = 152.8$	78.10	80.70	89.90	90.20	60.64	66.50	74.80	78.90	69.30	73.20	80.92	82.30	77.30	78.30	88.00	87.20
$\alpha = 2.09$ $\beta = 121.6$	47.20	53.10	61.90	68.10	46.75	56.39	64.00	70.40	57.54	62.21	68.10	72.30	55.30	62.40	67.70	73.90
$\alpha = 2.25$ $\beta = 115.5$	49.40	60.70	67.60	76.00	50.55	61.30	65.80	70.80	58.34	65.10	72.16	73.83	56.80	68.20	73.80	77.60
Distribución Gumbel																
$\theta = 142.33$ $\beta = 22.73$	73.20	82.30	83.90	85.80	35.20	46.70	61.86	62.48	47.15	56.60	63.74	69.20	59.40	66.10	71.66	74.70
$\theta = 157.20$ $\beta = 43.48$	33.87	38.50	31.70	30.60	19.58	26.70	31.34	33.63	19.94	28.24	36.26	36.43	24.88	34.00	42.20	43.20
$\theta = 94.48$ $\beta = 37.04$	12.30	12.20	14.30	16.60	8.90	10.08	13.39	14.07	7.69	7.68	10.58	11.80	9.30	10.10	11.40	15.90
$\theta = 79.86$ $\beta = 28.57$	16.30	11.70	12.00	13.30	11.80	12.57	14.20	14.79	10.26	9.49	12.59	11.49	10.20	9.30	14.30	14.90
Distribución log-normal																
$\theta = 5.09$ $\beta = 0.449$	36.90	31.00	32.10	34.70	20.00	27.17	31.94	34.07	23.28	32.83	37.60	40.30	28.67	39.40	43.10	44.30
$\theta = 4.80$ $\beta = 0.356$	31.50	24.80	24.90	30.20	15.18	19.86	23.80	29.81	19.10	21.44	25.57	34.06	23.50	27.10	31.07	39.56
$\theta = 4.66$ $\beta = 0.370$	33.00	28.40	27.80	30.70	14.96	19.40	28.50	30.07	20.58	24.05	33.67	33.57	24.88	28.60	37.10	40.36
$\theta = 4.50$ $\beta = 0.311$	24.80	19.70	22.38	23.90	14.29	17.63	18.48	22.58	14.29	18.40	20.46	24.15	18.70	21.10	22.90	27.60
Distribución log-logística																
$\theta = 4.79$ $\beta = 0.237$	31.80	56.50	68.50	73.50	57.19	59.54	65.53	66.97	60.56	62.00	67.10	69.23	57.50	58.30	66.40	68.70
$\theta = 4.91$ $\beta = 0.280$	34.90	53.30	70.20	74.30	53.25	64.07	65.73	61.70	57.49	65.10	68.33	65.20	61.11	63.14	66.50	65.50
$\theta = 4.68$ $\beta = 0.180$	22.60	40.70	58.20	66.90	54.25	57.94	64.10	67.90	56.54	61.20	64.30	69.70	52.40	57.60	61.50	66.50
$\theta = 4.66$ $\beta = 0.303$	38.90	52.40	68.80	70.40	57.50	58.84	65.00	69.80	57.34	62.24	65.90	70.60	54.80	61.30	64.90	69.90

gráficas es que si el tamaño de la muestra es pequeña, los criterios de selección son similares. Si dos modelos hacen predicciones muy parecidas, no importa cuál de los dos se escoja;

en cambio, es preciso poder distinguir entre distribuciones que difieren considerablemente, pues las predicciones realizadas con las mismas podrían ser muy diferentes entre sí.

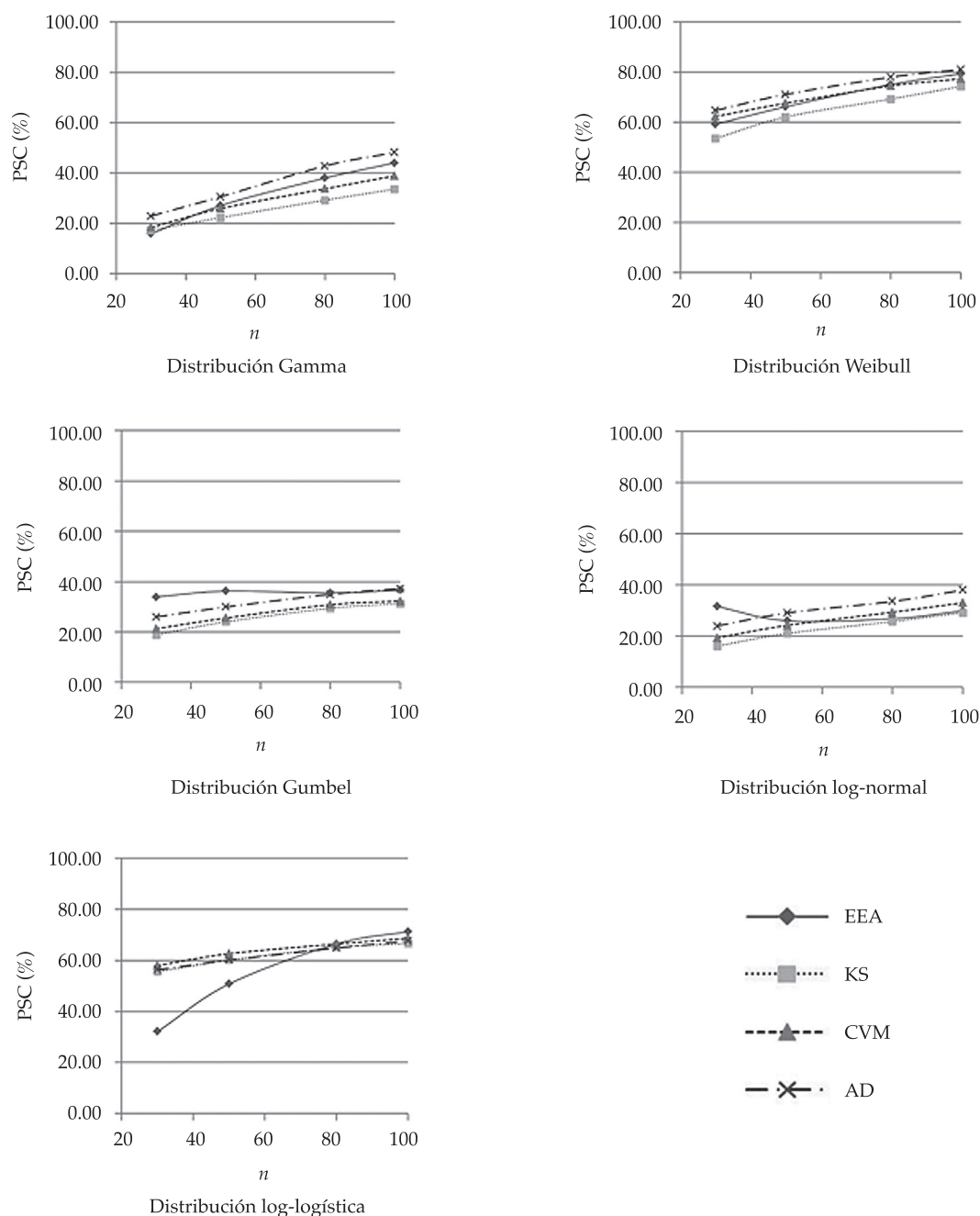


Figura 1. Gráficas del porcentaje de selección correcta (PSC) de los diferentes criterios de selección de modelos contra el tamaño de la muestra n .

Estudio de sensibilidad

Los resultados del estudio de sensibilidad se resumen en el cuadro 3.

Se muestran los valores de δRECM y δS para los estimadores obtenidos, usando los modelos

seleccionados por los diferentes criterios. Para cada distribución madre, los valores se han promediado para todos los juegos de parámetros utilizados y se han clasificado de acuerdo con el tamaño de la muestra y el periodo de retorno usados en la simulación. Se observa que:

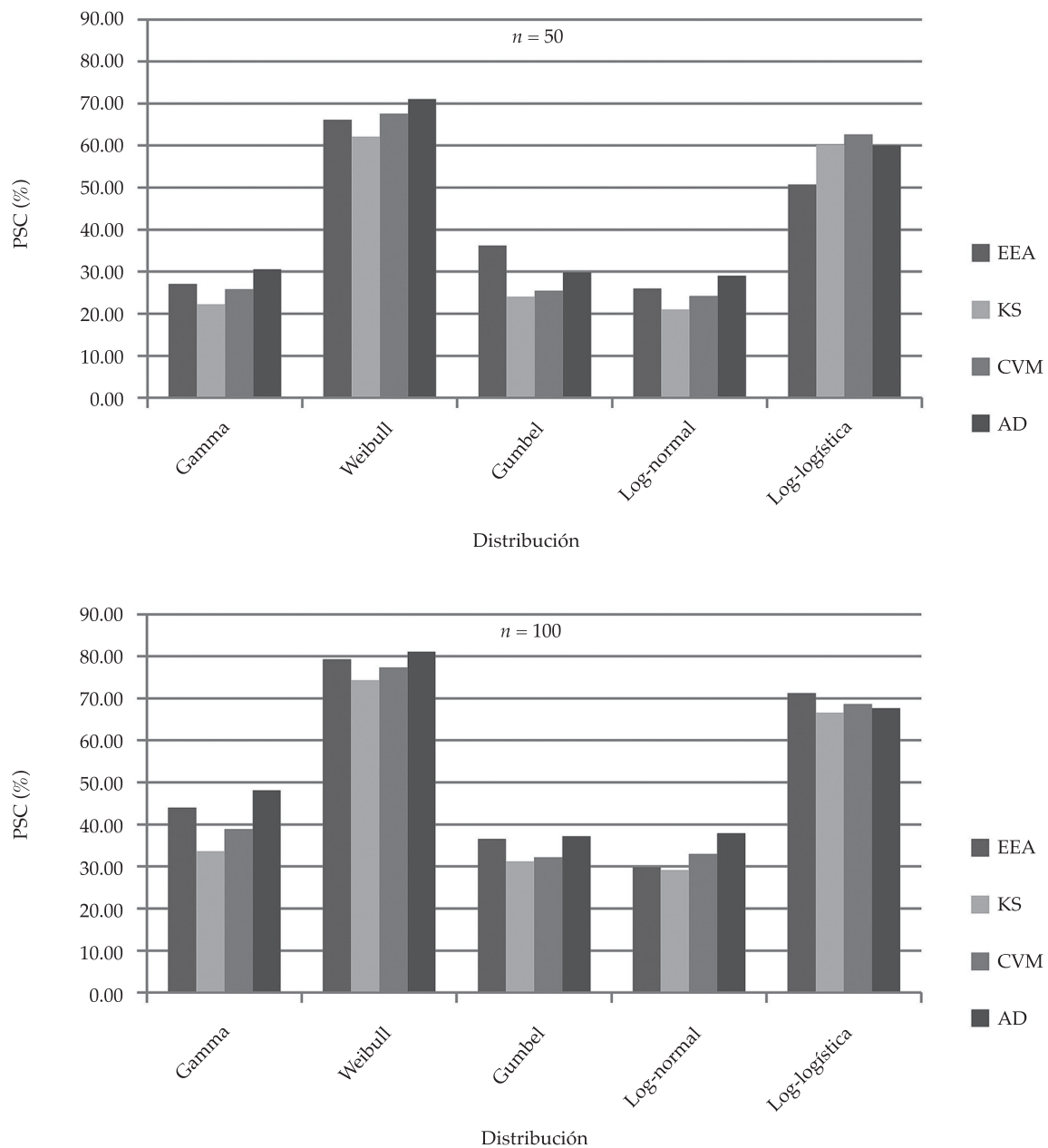


Figura 2. PSC obtenidos con los distintos criterios de selección para diferentes distribuciones madre.

- La magnitud de la δRECM aumenta con el periodo de retorno y disminuye con el incremento del tamaño de la muestra. Esto era de esperarse, ya que la varianza de los estimadores de x_T aumenta cuando sube T , y disminuye cuando aumenta n (Silva et al., 2011).
- Cuando la distribución madre es log-logística y para $T = 10$, las magnitudes de la δRECM y del δS asociadas con el criterio de EEA son significativamente mayores que para otros criterios.
- Los valores de δRECM más pequeños significan que los estimadores $\hat{x}_T$ se

Cuadro 3. Valores de δRECM y δS obtenidos para diferentes distribuciones madre.

Distribución gamma									
Tamaño de la muestra	Periodo de retorno	EEA		KS		CVM		AD	
		δRECM	δS	δRECM	δS	δRECM	δS	δRECM	δS
30	10	0.071	-0.007	0.071	-0.009	0.071	-0.011	0.070	-0.012
30	100	0.153	0.038	0.153	0.037	0.150	-0.033	0.115	-0.010
50	10	0.055	-0.004	0.055	-0.004	0.055	-0.006	0.054	-0.006
50	100	0.128	0.040	0.132	0.040	0.130	0.038	0.096	-0.001
Distribución Weibull									
30	10	0.076	-0.004	0.086	0.007	0.078	-0.003	0.075	-0.008
30	100	0.183	0.069	0.297	0.131	0.213	0.081	0.131	0.030
50	10	0.058	-0.003	0.065	0.006	0.060	0.000	0.057	-0.004
50	100	0.123	0.040	0.229	0.096	0.175	0.062	0.104	0.024
Distribución Gumbel									
30	10	0.078	-0.013	0.079	-0.019	0.079	-0.023	0.078	-0.018
30	100	0.147	-0.005	0.147	-0.015	0.147	-0.014	0.130	-0.051
50	10	0.060	-0.011	0.061	-0.015	0.061	-0.016	0.060	-0.011
50	100	0.120	0.009	0.120	-0.004	0.119	-0.003	0.102	-0.036
Distribución log-normal									
30	10	0.092	-0.029	0.092	-0.024	0.092	-0.026	0.093	-0.027
30	100	0.171	0.003	0.167	-0.010	0.164	-0.012	0.161	-0.066
50	10	0.071	-0.014	0.071	-0.017	0.071	-0.017	0.072	-0.018
50	100	0.142	0.024	0.140	0.003	0.135	0.008	0.131	-0.006
Distribución log-logística									
30	10	0.170	0.030	0.117	-0.010	0.117	-0.012	0.117	-0.014
30	100	0.226	-0.081	0.225	-0.096	0.227	-0.096	0.229	-0.104
50	10	0.136	0.024	0.091	0.004	0.091	-0.006	0.091	-0.007
50	100	0.185	-0.055	0.184	-0.076	0.186	-0.076	0.188	-0.080

encuentran más cerca del verdadero valor de x_T .

- d) Por lo general, para $T = 10$ no se observan grandes diferencias entre los criterios.
- e) Para $T = 100$, el criterio de AD tiende a producir las estimaciones más precisas; éstas tienden a ser más pequeñas que las de los demás criterios considerados.

Conclusiones

Las simulaciones muestran que los criterios de selección ayudan a escoger la mejor distribución para un análisis de frecuencias. Se encontró que de los criterios empleados, el mejor fue AD, seguido por el EEA. También

se observó que es difícil discriminar entre dos distribuciones parecidas. También se encontró que el porcentaje de selección correcta (PSC) de los criterios de selección depende del tamaño de la muestra n y de la distribución que siguen los datos generados. En general, el criterio de AD resulta con mejores estimaciones para $T = 100$, aun cuando no escoge la distribución correcta. También se observó que tiende a producir estimaciones más pequeñas que los demás criterios considerados, y que en la mayoría de los casos subestima el valor x_T . Para $T = 10$ no hay grandes diferencias entre los criterios. A partir de los resultados obtenidos, se recomiendan muestras con tamaño de por lo menos $n = 50$ para tener un buen desempeño

de las pruebas de AD y EEA. El empleo de las pruebas de KS y CVM no se recomienda a menos que se tengan muestras grandes.

Referencias

- Aksoy, H. (November 2000). Use of Gamma Distribution in Hydrological Analysis. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 24(6), 419-428.
- Aparicio-Mijares, F. J. (2005). *Fundamentos de Hidrología de Superficie* (304 pp.). México, DF: Limusa Noriega Editores.
- Atroosh, K. B., & Moustafa, A. T. (June 2012). An Estimation of the Probability Distribution of Wadi Bana Flow in the abyan Delta of Yemen. *Journal of Agricultural Science*, 4(6), 80-89.
- Balasooriya, U., Low, C. K., & Wong, A. Y. W. (2005). Modeling Insurance Loss Data: The log-EIC Distribution. *Journal of Actuarial Practice*, 12, 101-125.
- Dan'Azumi, S., Shamsudin, S., & Aris, A. (June 2010). Modeling the Distribution of Rainfall Intensity using Hourly Data. *American Journal of Environmental Sciences*, 6(3), 238-243.
- De Dios-Lara, E. (1998). *Análisis hidrológico de tormentas de diseño para el estado de Tabasco* (215 pp.). Tesis de Maestría en Ingeniería Hidráulica. Cárdenas, México: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ingeniería y Arquitectura.
- Dey, A. K., & Kundu, D. (2009). Discriminating between the Log-Normal and Log-Logistic Distributions. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 39(2), 280-292.
- Di Baldassarre, G., Laio, F., & Montanari, A. (2009). Design Flood Estimation using Model Selection Criteria. *Physics and Chemistry of the Earth*, 34(10-12), 606-611.
- El Adlouni, S., Bobée, B., & Ouarda, T. B. M. J. (2008). On the Tails of Extreme Event Distributions in Hydrology. *Journal of Hydrology*, 154, 16-33.
- Ganancias-Martínez, F. (2009). *Cátedra de Hidrología y Procesos Hidráulicos* (32 pp.). Clase de Estadística Hidrológica. Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Haan, C. T. (1994). *Statistical Methods in Hydrology* (378 pp.). Sixth printing. Ames, Iowa, USA: Iowa State University Press.
- Haddad, K., & Rahman, A. (2011). Selection of the Best Fit Flood Frequency Distribution and Parameter Estimation Procedure: A Case Study for Tasmania in Australia. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess*, 25, 415-428.
- Laio, F. (2004). Cramer-von Mises, and Anderson-Darling Goodness of Fit Tests for Extreme Value Distributions with Unknown Parameters. *Water Resources Research*, 490, W09308, doi:10.1029/2004WR003204, 10.
- Laio, F., Di Baldassarre, G., & Montanari, A. (2009). Model Selection Techniques for the Frequency Analysis of Hydrological Extremes. *Water Resources Research*, 495, W07416, doi:10.1029/2007WR006666, 11.
- Markiewicz, I., Strupczewski, W. G., & Kochanek, K. (2010). On Accuracy of Upper Quantiles Estimation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 2167-2175.
- Mitosek, H. T., Strupczewski, W. G., & Singh, V. P. (2002). Toward an Objective Choice of an Annual Flood Peak Distribution (16 pp.). *5th ICHE, Warsaw Poland, CD Proceedings*, Track C, PDF 158.
- Quesenberry, C. P., & Kent, J. (1982). Selecting Among Probability Distributions used in Reliability. *Technometrics*, 24(1), 59-65.
- Raynal-Villaseñor, J. A. (2013). Probability Weighted Moments Estimators for the GEV Distribution for the Minima. *IJRRAS*, 15(1), 33-40.
- Shin, H., Jung, Y., Jeong, C., & Heo, J. H. (April 2011). Assessment of Modified Anderson-Darling Test Statistics for the Generalized Extreme Value and Generalized Logistic Distributions. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 26, 105-114.
- Silva, A. T., Naghettini, M., & Portela, M. M. (2011). Sobre a Estimacao de Intervalos de Confianca para os Quantis de Variáveis Aleatórias Hidrológicas. *Recursos Hídricos*, 32(2), 63-76.
- Suhaila, J., & Jemain, A. A. (2007). Fitting Daily Rainfall amount in Malasya Using the Normal Transform Distribution. *Journal of Applied Sciences*, 7(14), 1880-1886.
- Werner, T., & Upper, C. (2002). *Time Variation in the Tail Behavior of Bund Futures Returns*. Working Paper No. 199, Frankfurt: European Central Bank.

Dirección institucional de los autores

M.I.H. Roberto S. Flowers-Cano

M.C. Robert Jeffrey Flowers

Dr. Fabián Rivera-Trejo

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
División Académica de Ingeniería y Arquitectura
Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez
Km 1, Col. La Esmeralda
86690 Cunduacán, Tabasco, MÉXICO
Teléfono: +52 (993) 358 1500, extensiones 6758 y 6707
flowerscano@hotmail.com
robert.flowers@basicas.ujat.mx
jose.rivera@daia.ujat.mx



Haga clic aquí para escribir al autor



Bahía Lyttelton, Nueva Zelanda.

Foto: Víctor Manuel Pineda Blancarte.

Predicciones extremas de lluvia en 24 horas en el estado de Zacatecas, México

• Daniel Francisco Campos-Aranda* •

Profesor jubilado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México

*Autor de correspondencia

Resumen

Campos-Aranda, D.F. (septiembre-octubre, 2014). Predicciones extremas de lluvia en 24 horas en el estado de Zacatecas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(5), 199-225.

Cuando se dimensionan hidrológicamente obras hidráulicas grandes o pequeñas pero peligrosas por su ubicación cercana a centros de población o de importantes áreas económicas, es común utilizar crecientes de diseño asociadas a altos periodos de retorno como 1 000 o 10 000 años; incluso en algunas ocasiones se decide eliminar el riesgo de ser excedidas utilizando la creciente máxima probable. Por lo general, la obtención de estas crecientes de diseño no puede ser abordada con el método probabilístico, pues no existen datos de gasto máximo anual, entonces su estimación se realiza con métodos hidrológicos que transforman tormentas de diseño en hidrogramas de respuesta. Desafortunadamente, los registros pluviográficos son también bastante escasos y por ello, se procesan los registros de precipitación máxima diaria anual (PMD), que son mucho más comunes y amplios. En este estudio se procesaron los 98 registros de PMD con más de 25 datos, disponibles en el estado de Zacatecas. Se encontró que 17 son no homogéneos y por ello se eliminaron. Para el resto, 81 series anuales de máximos, se obtuvieron sus predicciones de periodos de retorno elevados variando de 100 a 10000 años. Se contrastaron las predicciones obtenidas con intervalos de recurrencia de 100, 1 000 y 10 000 años, con las disponibles como curvas isomáximas publicadas en 1976, por la extinta Secretaría de Recursos Hidráulicos y se encontró que tales mapas todavía son vigentes para el estado de Zacatecas. También se aplicó el método estadístico de David M. Hershfield para estimar la precipitación máxima probable (PMP) puntual en 24 horas. Esta PMP varió de 196.5 a 507.0 milímetros. Respecto a los cocientes entre la PMP y el valor máximo observado de PMD y entre la PMP y la predicción de 10 000 años, sus magnitudes medias de orden práctico son 4.20 y 2.20, respectivamente. Los análisis regionales de frecuencia realizados en dos zonas geográficas del estado de Zacatecas, permitieron demostrar su utilidad y precisión para estimar predicciones en sitios o localidades sin datos, pero ubicados dentro de tal región.

Palabras clave: precipitación máxima diaria anual, precipitación máxima probable, distribución Log-Pearson tipo III, distribución GVE, error estándar de ajuste, análisis regional de frecuencia.

Abstract

Campos-Aranda, D.F. (September-October, 2014). Extreme 24-Hour Rainfall Predictions in the State of Zacatecas, Mexico. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(5), 199-225.

When determining the hydrological dimensions of both large and small hydraulic works that are dangerous because of their proximity to populations or important economic areas, the use of design floods associated with high return periods is common, such as 1 000 or 10 000 years. At times, the risk to be exceeded is even eliminated by using the maximum probable flood. Generally, probabilistic methods cannot be used to obtain these design floods since annual maximum flow data do not exist. Therefore, it is estimated using hydrological methods that convert design storms into response hydrographs. Unfortunately, pluviograph data are also scarce and, therefore, annual maximum daily rainfall (MDR) records are processed, which are much more common and widespread. This study processed 98 MDR records with over 25 data available for the state of Zacatecas. Seventeen were not homogeneous and were therefore eliminated. For the remaining 81, annual maximum series predictions were obtained for high return periods varying from 100 to 10 000 years. Predictions obtained with recurrence intervals of 100, 1 000 and 10 000 years were compared with those available from maximum isocurves published in 1976 by the former Secretary of Hydraulic Resources and found that such maps are still valid for the state of Zacatecas. The David M. Hershfield statistical method was also applied for estimating probable maximum precipitation (PMP) punctually with duration of 24 hours. This PMP ranged from 196.5 to 507.0 millimeters. Regarding the ratios between the PMP and the maximum observed value of DMP, and between PMP and the prediction of 10 000 years, their practical average magnitudes are 4.20 and 2.20, respectively. The regional frequency analyses performed in two geographic regions in the state of Zacatecas made it possible to demonstrate their usefulness and accuracy in estimating predictions for sites or localities in that region that do not contain data.

Keywords: Annual daily maximum precipitation, probable maximum precipitation, Log-Pearson Type III distribution, GEV distribution, standard error of fit, regional flood frequency analysis.

Recibido: 16/10/13
Aceptado: 16/06/14

Introducción

El análisis de frecuencia de crecientes permite estimar los gastos máximos de diseño, que son eventos extremos asociados con una cierta probabilidad de excedencia, cuyo recíproco es el llamado periodo de retorno o intervalo promedio en años entre la ocurrencia de un evento igual o mayor. Su procedimiento consiste en ajustar una función de distribución de probabilidades o modelo probabilístico a la muestra disponible de gastos máximos anuales instantáneos y entonces utilizarla para obtener la predicciones buscadas.

Cuando tales predicciones o crecientes de diseño dimensionarán hidrológicamente grandes embalses de aprovechamiento o control, diques de protección de centrales nucleares, o bien buscarán definir la cota máxima de inundaciones para ubicar arriba de tal nivel, carreteras importantes y plantas de tratamiento o de abastecimiento de agua potable, los periodos de retorno que se utilizan son elevados, variando de 1 000 a 10 000 años, e incluso buscando suprimir el riesgo; por ello se emplea la *creciente máxima probable*, la cual se estima con base en la *precipitación máxima probable* (Smith, 1993; Gupta, 2008; Shaw *et al.*, 2011).

Debido a la escasez de estaciones de aforos en los sitios de interés, la estimación de las crecientes de diseño se realiza a través del llamado *método hidrológico*, el cual transforma una tormenta de diseño en un hidrograma de respuesta de la cuenca. El procedimiento fundamental de este método es la técnica de los hidrogramas unitarios (HU), sean éstos identificados o sintéticos. Entre los segundos se tienen los HU adimensionales y los triangulares, que son su simplificación.

Por otra parte, dada la escasez de pluviógrafos en las cuencas rurales, sean éstas pequeñas o grandes, el enfoque obligado para desarrollar las *tormentas de diseño* consiste en utilizar los registros pluviométricos, que son más abundantes y amplios. Los registros de precipitación máxima diaria anual (PMD)

son procesados como variables aleatorias, ajustándoles un modelo probabilístico para obtener las predicciones buscadas, es decir, se desarrolla con ellos un análisis de frecuencia.

El *objetivo* de este trabajo consistió en analizar y procesar los 134 registros disponibles de PMD del estado de Zacatecas, México, para estimar las predicciones correspondientes a los periodos de retorno de 100, 500, 1 000, 5 000 y 10 000 años, con base en dos modelos probabilísticos que se aplican bajo precepto. También se estimó la precipitación máxima probable (PMP) puntual en 24 horas de duración, por medio del método estadístico de David M. Hershfield. Existiendo mapas del país de curvas isomáximas de 100, 1 000 y 10 000 años de periodo de recurrencia, publicadas en 1976 por la extinta Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), se contrastaron sus valores con las predicciones obtenidas. Se encontró que tales mapas todavía son válidos. Respecto a las relaciones entre la PMP y el valor más grande observado de PMD y aquella de periodo de retorno 10 000 años, se definieron los siguientes valores promedio de carácter práctico: 4.20 y 2.20, respectivamente. Se exponen también los resultados de dos análisis regionales de frecuencia, uno para la zona geográfica de Juchipila y otro para la Región Hidrológica Núm. 37 (El Salado) del estado de Zacatecas, México.

Datos, métodos y resultados

Registros pluviométricos procesados

El estado de Zacatecas dispone actualmente de 134 estaciones pluviométricas con registro de precipitación máxima diaria anual (PMD), según información proporcionada por la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua (Conagua). Tomando en cuenta que tales registros serán procesados probabilísticamente para obtener predicciones en altos periodos de retorno, se decidió utilizar sólo aquellas series con más de 25 datos. En el cuadro 1 se muestran las características generales de los

98 registros con más de 25 años, así como sus propiedades estadísticas insesgadas, definidas con la media aritmética y los coeficientes de variación, asimetría, curtosis y de correlación serial de orden 1. El registro más largo es de 68 años y corresponde a la estación San Pedro Piedra Gorda, pero se tienen además 20 series con 50 o más años. Previo a procesamiento probabilístico y estadístico de cada registro de *PMD* se revisó cada uno para detectar todos los valores superiores a 100 milímetros y solicitar a la Conagua de Zacatecas su verificación o rechazo, así como el dato correcto.

Pruebas de calidad estadística

Para que los resultados de un procesamiento probabilístico de una serie de *PMD* conduzca a predicciones confiables, tales datos deben proceder de un proceso aleatorio estacionario, es decir que no haya cambiado con el tiempo. Lo anterior implica que la serie de *PMD* debe estar integrada por valores independientes y estar libres de componentes determinísticas que la vuelvan no homogénea. Al tomar sólo los valores anuales de precipitación máxima diaria se tiene la seguridad de que ellos serán independientes, pero pueden mostrar persistencia, tendencia, cambios en la media o bien variabilidad excesiva o escasa.

Para probar la calidad estadística de cada registro se aplicaron las siguientes siete pruebas: (1) test de Von Neumann es una prueba de no aleatoriedad contra componentes determinísticas no especificadas (WMO, 1971; Buishand, 1982); (2) la prueba de Anderson detecta persistencia a través del coeficiente de correlación serial de orden 1 (Linsley *et al.*, 1988); (3) la prueba de Sneyers también de persistencia es más recomendada en registros que no son normales (WMO, 1971); (4) el test de Kendall detecta tendencia, sobre todo si ésta es lineal (Kottegoda, 1980); (5) el test de Spearman también de tendencia es más general (WMO, 1971); (6) la prueba de Cramer permite comparar medias por subperiodos (WMO, 1971), y por último, (7) la prueba de Bartlett,

que busca inconsistencia de la dispersión (WMO, 1971; Ruiz-Maya, 1977).

Resultados de las pruebas estadísticas

En el cuadro 2 se enlistan las 17 estaciones pluviométricas que fueron detectadas como no homogéneas debido a que muestran las componentes determinísticas que se indican. Cuando la persistencia o la tendencia sólo fue detectada con una de las dos pruebas específicas aplicadas, se designó como *ligera*. Donde el test de Von Neumann mostró pérdida de aleatoriedad se indicó al registro como no aleatorio.

Además, 12 registros mostraron sólo persistencia ligera, detectada con la prueba de Sneyers, tales registros fueron procesados y son los siguientes: Ameca La Vieja, Boca del Tesorero, Camacho, Cedros, García de la Cadena, Genaro Codina, Guadalupe, Juan Aldama, Nochistlán, Palmillas, San Pedro Piedra Gorda y Villa de Cos. Por lo anterior, fueron 81 los registros procesados, cuya ubicación se muestra en la figura 1. En las figuras 2, 3 y 4 se muestran tres registros no homogéneos, que no tienen años faltantes. La tendencia lineal mostrada en tales figuras fue calculada y probada según criterio de Ostle y Mensing (1975).

Predicciones de altos periodos de retorno

La definición clásica de *probabilidad* indica que es el cociente del número de casos favorables al evento entre el número de casos posibles y por ello varía de cero a uno; el primer límite implica el evento improbable y el segundo el evento seguro. Entonces, un evento anual extremo que sea igualado o excedido una vez en promedio cada 100 años tiene una probabilidad de excedencia de 0.01 y su complemento con la unidad será la probabilidad de que no sea excedido, es decir 0.99, o bien el 99%. Lo anterior implica que el evento extremo cuyo intervalo medio de recurrencia es de 10 000 años, su probabilidad de excedencia es 0.0001, esto es muy baja, de sólo el 0.01%.

Cuadro 1. Características generales, parámetros estadísticos y resultados de las pruebas de homogeneidad en los registros de precipitación máxima diaria anual de las 98 estaciones pluviométricas con más de 25 años de registro del estado de Zacatecas, México.

Núm. Clave¹	Nombre de la estación climatológica	Registro		PMD³		Parámetros estadísticos⁴					Pruebas estadísticas⁵						
		Periodo	ND²	Mínima	Máxima	Me	Cv	Cs	Ck	r₁	VN	PA	PS	TK	TS	PC	PB
1-1	Achimec	1947-2012	50	20.0	82.5	44.7	0.324	0.664	3.001	0.173	H	H	H	H	H	H	H
2-2	Adjuntas del Refugio	1980-2012	31	21.0	86.0	44.7	0.369	0.893	3.561	-0.125	H	H	H	NH	NH	H	NH
3-3	Agua Nueva	1963-2012	43	17.1	76.0	36.3	0.335	0.987	4.841	0.100	H	H	H	H	H	H	H
4-4	Ameca La Vieja	1977-2011	30	25.5	73.0	44.5	0.290	0.519	2.615	0.083	H	H	H	NH	H	H	H
5-5	Boca del Tesorero	1966-2012	44	20.2	82.0	43.6	0.302	0.899	3.941	-0.022	H	H	NH	H	H	H	H
6-6	Calera de Víctor Rosales	1961-2012	51	18.5	72.0	41.0	0.295	0.770	3.503	0.069	H	H	H	H	H	H	H
7-7	Camacho	1974-2012	31	18.0	59.0	28.8	0.301	1.416	6.523	0.156	H	H	NH	H	H	H	H
8-9	Cañitas de Felipe Pescador	1974-2012	37	16.0	75.0	37.5	0.410	0.920	3.372	-0.009	H	H	H	H	H	H	H
9-10	Coapas	1971-2012	41	23.0	67.8	41.6	0.280	0.588	3.026	-0.254	H	H	H	H	H	H	H
10-11	Chalchihuites	1962-2011	47	20.0	104.5	43.7	0.386	1.102	5.336	0.027	H	H	H	H	H	H	H
11-12	Chichimequillas	1981-2011	31	20.0	70.8	42.7	0.360	0.441	2.205	0.356	NH	NH	NH	NH	NH	NH	H
12-13	Cedros	1971-2011	38	18.0	60.5	32.8	0.299	1.044	3.965	0.155	H	H	NH	H	H	H	H
13-14	Col. González Ortega	1970-2011	37	26.8	106.0	47.8	0.417	1.536	5.230	-0.171	H	H	H	H	H	H	H
14-15	Concepción del Oro	1960-2011	47	13.8	83.1	37.3	0.419	0.765	3.412	-0.093	H	H	H	H	H	H	H
15-16	Corrales	1978-2012	33	20.5	92.1	44.0	0.387	1.281	4.873	-0.221	H	H	H	H	H	H	H
16-17	Cueva Grande	1977-2012	33	9.0	85.6	43.2	0.429	0.262	2.841	0.213	H	H	NH	NH	NH	NH	H
17-18	El Arenal	1974-2012	39	20.0	100.0	49.0	0.396	0.797	3.505	-0.252	H	H	H	H	NH	H	H
18-19	El Cazadero	1958-2012	55	17.0	95.5	42.9	0.398	1.249	4.584	-0.034	H	H	H	H	H	H	H
19-20	El Nigromante	1984-2012	29	17.5	79.0	42.8	0.365	0.630	3.126	0.056	H	H	H	H	H	H	H
20-21	El Platanito	1957-2012	53	24.0	108.5	51.6	0.303	0.972	5.185	0.289	NH	NH	NH	H	H	H	NH
21-22	El Romerillo	1980-2011	30	27.3	78.2	46.4	0.296	0.588	2.803	-0.169	H	H	H	H	H	H	H
22-23	El Rusio	1967-2011	45	20.0	71.5	41.8	0.382	0.349	1.928	0.075	H	H	H	NH	NH	H	H
23-24	El Salvador	1984-2011	25	20.0	88.5	46.8	0.361	0.983	3.860	0.173	H	H	H	H	H	H	H
24-25	El Sauz	1947-2012	66	21.2	67.2	38.5	0.287	0.660	2.808	0.040	H	H	H	H	H	H	H
25-26	Espíritu Santo	1984-2012	28	24.0	85.0	46.9	0.365	0.907	3.409	-0.193	H	H	H	H	H	H	H
26-27	Excámé	1946-2012	66	30.5	82.0	52.8	0.267	0.470	2.344	0.119	H	H	H	H	H	H	H
27-28	Felipe Ángeles (S)	1979-2011	26	18.0	76.5	44.0	0.345	0.216	2.958	0.076	H	H	H	H	H	H	H

Cuadro 1 (continuación). Características generales, parámetros estadísticos y resultados de las pruebas de homogeneidad en los registros de precipitación máxima diaria anual de las 98 estaciones pluviométricas con más de 25 años de registro del estado de Zacatecas, México.

28-29	Felipe Ángeles (V)	1980-2012	33	26.0	78.0	44.3	0.326	0.794	3.044	0.240	H	H	NH	NH	H	H
29-30	Fresnillo	1950-2012	54	15.5	86.2	43.9	0.354	0.795	3.919	-0.178	H	H	H	H	H	H
30-31	García de la Cadena	1984-2012	27	33.2	82.3	57.7	0.237	0.091	2.990	-0.016	H	H	NH	H	H	H
31-32	Genaro Codina	1980-2012	28	27.7	66.8	43.5	0.251	0.413	2.491	-0.051	H	H	NH	H	H	H
32-33	Gral. Guadalupe Victoria	1966-2011	45	9.0	95.5	43.5	0.364	1.074	5.138	-0.322	H	NH	H	H	H	H
33-34	Gruñidora	1964-2010	44	12.4	91.0	40.3	0.436	0.874	3.983	0.116	H	H	NH	NH	H	NH
34-35	Guadalupe	1979-2012	31	16.5	86.0	43.1	0.367	0.688	4.237	0.045	H	H	NH	H	H	H
35-36	Huanusco	1967-2010	36	26.7	71.0	48.1	0.257	0.194	2.086	-0.108	H	H	H	H	H	H
36-37	Huitzila	1982-2012	25	36.3	98.5	61.7	0.271	0.520	2.776	0.125	H	H	H	H	H	H
37-38	Jalpa	1979-2012	34	24.0	75.7	50.3	0.210	0.505	4.198	-0.058	H	H	H	H	H	H
38-39	Jerez	1963-2012	42	23.0	69.3	40.8	0.286	0.820	3.265	0.067	H	H	H	H	H	H
39-40	Jiménez del Teúl	1963-2011	40	18.0	77.0	36.9	0.361	1.097	4.638	-0.065	H	H	H	H	H	H
40-41	Juan Aldama	1975-2010	34	20.0	80.0	46.8	0.345	0.558	2.953	0.165	H	H	NH	H	H	H
41-42	Juchipila	1947-2010	59	26.5	90.2	46.5	0.284	1.066	4.264	0.117	H	H	H	H	H	H
42-43	La Florida	1956-2011	53	25.5	76.0	44.2	0.270	0.765	3.364	0.075	H	H	H	H	H	H
43-44	La Villita	1958-2011	53	35.2	82.1	53.9	0.206	0.576	3.107	0.028	H	H	H	H	H	H
44-45	Las Ánimas	1980-2011	28	19.9	76.8	42.6	0.280	0.519	4.684	0.158	H	H	NH	H	H	NH
45-46	Loreto	1964-2011	46	20.0	106.0	51.2	0.349	1.005	4.334	0.028	H	H	H	H	H	H
46-47	Los Campos	1980-2011	30	18.0	98.5	48.9	0.356	1.058	4.537	0.117	H	H	NH	H	H	H
47-49	Luis Moya	1980-2010	27	25.5	89.7	51.7	0.336	0.572	3.164	0.177	H	H	NH	H	H	NH
48-50	Malpaso	1975-2011	35	17.0	71.0	39.3	0.390	0.591	2.925	0.180	H	H	NH	NH	H	H
49-51	Mesillas	1980-2011	30	20.0	84.9	42.7	0.351	0.653	3.913	-0.204	H	H	H	H	H	H
50-52	Mezquital del Oro	1982-2011	26	37.0	102.3	59.2	0.262	1.255	4.698	0.093	H	H	H	H	H	H
51-53	Milpillas de Allende	1979-2011	32	19.3	80.0	48.8	0.299	0.181	2.687	0.233	H	H	NH	NH	NH	H
52-55	Momax	1980-2011	25	26.5	80.0	46.4	0.320	1.195	4.049	-0.308	H	H	H	H	H	H
53-56	Monte Escobedo	1965-2011	44	31.5	79.3	49.5	0.228	0.546	2.989	0.038	H	H	H	H	H	H
54-57	Moyahua de Estrada	1980-2011	31	33.0	80.0	50.9	0.240	0.659	2.990	0.009	H	H	H	H	H	H
55-58	Nochistlán	1950-2011	58	19.0	101.0	48.0	0.359	0.681	3.418	0.172	H	H	NH	H	H	H
56-59	Nuevo Mercurio	1959-2011	38	16.2	76.0	35.3	0.422	1.151	3.934	-0.005	H	H	H	H	H	H
57-60	Ojo Caliente	1969-2011	50	13.4	87.0	41.6	0.380	0.770	3.951	-0.057	H	H	H	H	H	H
58-61	Pajaritos de la Sierra	1974-2009	29	28.0	71.2	49.5	0.237	0.088	2.171	0.415	NH	NH	NH	NH	NH	H
59-62	Palmillas	1980-2011	27	22.0	82.0	44.5	0.319	1.014	4.640	0.241	H	H	NH	H	H	H

Cuadro 1 (continuación). Características generales, parámetros estadísticos y resultados de las pruebas de homogeneidad en los registros de precipitación máxima diaria anual de las 98 estaciones pluviométricas con más de 25 años de registro del estado de Zacatecas, México.

60-64	Pastorías	1978-2011	29	23.0	83.0	47.2	0.333	0.325	2.638	0.322	NH	NH	H	NH	H	H
61-65	Pinos	1947-2011	55	25.0	93.8	48.9	0.326	0.762	3.353	-0.134	H	H	H	H	H	H
62-66	Pino Suárez	1980-2011	28	20.0	96.0	48.1	0.374	1.025	4.102	-0.221	H	H	H	H	H	H
63-68	Presa El Chique	1950-2011	59	22.4	75.2	44.4	0.255	0.534	3.358	0.044	H	H	H	H	H	H
64-63	Presa Palomas	1967-2011	44	30.1	78.9	48.0	0.260	0.715	2.911	0.090	H	H	H	H	H	H
65-69	Presa Santa Rosa	1947-2011	62	22.8	79.0	41.2	0.335	0.975	3.571	0.039	H	H	H	H	H	H
66-70	Puerto de San Francisco	1970-2011	40	27.3	85.0	43.5	0.262	1.270	6.304	0.193	H	H	H	H	H	H
67-71	Purísima de Sifuentes	1978-2011	28	18.0	96.3	40.3	0.426	1.393	6.163	0.075	H	H	H	H	H	NH
68-73	Río Grande	1975-2011	37	18.0	90.0	41.8	0.413	1.093	4.186	-0.192	H	H	H	H	H	H
69-108	Sain Alto	1987-2011	25	22.5	91.0	44.8	0.352	1.426	5.581	-0.218	H	H	H	H	H	H
70-74	San Andrés	1973-2011	36	19.0	93.0	47.3	0.410	0.707	3.076	-0.268	H	H	H	H	H	H
71-75	San Antonio del Ciprés	1970-2011	37	16.0	82.3	44.9	0.314	0.442	3.105	0.070	H	H	H	H	H	H
72-76	San Benito	1970-2011	28	20.0	86.0	46.2	0.434	0.683	2.623	-0.120	H	H	H	H	H	H
73-77	San Gil	1970-2011	36	13.0	76.0	35.5	0.417	0.770	3.645	-0.034	H	H	H	H	NH	H
74-78	San Isidro de los González	1976-2011	33	21.0	72.0	39.3	0.297	0.874	3.793	-0.253	H	H	H	H	H	H
75-79	San Jerónimo	1980-2011	30	20.5	69.0	40.0	0.307	0.543	2.991	-0.384	H	H	H	H	H	H
76-80	San José de Llanetes	1976-2011	30	22.0	71.2	38.3	0.328	1.322	4.634	-0.014	H	H	H	H	H	NH
77-81	San Juan Capistrano	1972-2011	32	23.0	76.0	46.1	0.305	0.531	2.785	0.249	H	NH	NH	NH	H	H
78-82	San Pedro de la Sierra	1978-2010	25	20.0	72.0	44.5	0.310	0.496	2.938	-0.252	H	H	H	H	H	H
79-83	San Pedro Piedra Gorda	1943-2011	68	16.0	80.0	41.5	0.266	0.409	4.058	-0.029	H	H	NH	H	H	H
80-85	San Tiburcio	1973-2011	37	16.0	80.0	40.1	0.384	0.839	3.441	-0.092	H	H	H	H	H	H
81-86	Sierra Hermosa	1978-2011	32	22.0	98.0	46.7	0.461	0.925	3.239	-0.284	H	H	H	H	H	H
82-113	Sombrerete	1984-2011	28	20.6	76.8	38.7	0.352	0.959	4.283	-0.020	H	H	H	H	H	NH
83-88	Tayahua	1965-2010	44	20.0	81.1	43.9	0.280	0.571	3.738	0.158	H	H	NH	H	H	H
84-89	Tecomate	1948-1999	50	27.5	76.5	46.0	0.247	0.526	3.057	-0.175	H	H	H	H	H	H
85-90	Tepetongo	1980-2011	28	29.0	80.0	44.5	0.297	0.892	3.599	0.426	NH	NH	NH	NH	NH	H
86-91	Teúl de González Ortega	1963-2011	44	20.5	93.0	51.6	0.302	0.697	3.492	-0.184	H	H	H	H	H	H
87-92	Tierra y Libertad	1982-2011	28	20.0	80.0	43.4	0.354	0.626	3.202	0.048	H	H	NH	NH	H	H
88-93	Tlachichila	1977-2011	25	30.4	97.8	54.7	0.266	1.152	5.146	-0.136	H	H	H	H	H	NH
89-94	Tlaltenango	1950-2011	56	32.5	92.2	53.1	0.256	0.634	3.017	-0.061	H	H	H	H	H	H
90-95	Trancoso	1952-2010	54	19.6	69.5	44.0	0.277	-0.144	2.559	0.081	H	H	H	H	H	H
91-96	Valparaíso	1975-2011	32	26.0	66.0	41.7	0.242	0.594	3.302	0.170	H	H	NH	NH	H	H
92-97	Vicente Guerrero	1981-2011	25	22.6	71.0	47.4	0.266	0.171	2.936	0.182	H	H	H	H	H	H

Cuadro 1 (continuación). Características generales, parámetros estadísticos y resultados de las pruebas de homogeneidad en los registros de precipitación máxima diaria anual de las 98 estaciones pluviométricas con más de 25 años de registro del estado de Zacatecas, México.

93-98	Villa de Cos	1963-2011	45	21.0	100.2	49.3	0.359	0.753	3.478	0.191	H	H	NH	H	H	H	H
94-99	Villa García	1960-2011	52	20.4	81.5	47.5	0.334	0.527	2.814	0.045	H	H	H	H	H	H	H
95-100	Villa González Ortega	1978-2010	31	22.3	69.3	40.7	0.325	0.519	2.528	0.047	H	H	H	H	H	H	H
96-101	Villa Hidalgo	1966-2011	43	15.8	97.5	46.5	0.372	0.775	3.752	0.042	H	H	H	H	H	H	H
97-102	Villanueva	1963-2011	47	16.0	66.5	39.0	0.308	0.244	2.698	0.233	NH	NH	NH	H	H	H	H
98-103	Zacatecas	1953-2010	58	16.4	82.5	46.8	0.308	0.428	2.937	0.002	H	H	H	NH	NH	NH	H

Simbología:

¹ número según Dirección Local Zacatecas de la Conagua.

² número de años (datos) procesados.

³ precipitación máxima diaria anual del registro.

⁴ *Me* media aritmética, en milímetros.

Cv coeficiente de variación, adimensional.

Ck coeficiente de asimetría, adimensional.

*r*₁ coeficiente de curtosis, adimensional.

⁵ *VN* prueba de Von Neumann (H = homogénea y NH = no homogénea).

PA prueba de Anderson.

PS prueba de Sneyers.

TK test de Kendall.

TS test de Spearman.

PC prueba de Cramer.

PB prueba de Bartlett.

Cuadro 2. Estaciones pluviométricas eliminadas por mostrar componentes determinísticas.

Estación (clave)	Componente determinística detectada
1. Adjuntas del Refugio (2)	Tendencia y variabilidad.
2. Chichimequillas (12)	No aleatorio, persistencia, tendencia y cambio en la media.
3. Cueva Grande (17)	Persistencia ligera, tendencia y cambio en la media.
4. El Platanito (21)	No aleatorio, persistencia y variabilidad.
5. El Rusio (23)	Tendencia.
6. Felipe Ángeles (29)	Persistencia ligera y tendencia.
7. Gruñidora (34)	Persistencia ligera, tendencia y variabilidad.
8. Malpaso (50)	Persistencia ligera y tendencia.
9. Milpillas de Allende (53)	Persistencia ligera, tendencia y cambio en la media.
10. Pajaritos de la Sierra (61)	No aleatorio, persistencia, tendencia y cambio en la media.
11. Pastorías (64)	No aleatorio, persistencia y tendencia ligera.
12. San Juan Capistrano (81)	Persistencia ligera y tendencia.
13. Tepetongo (90)	No aleatorio, persistencia, tendencia y cambio en la media.
14. Tierra y Libertad (92)	Tendencia.
15. Valparaíso (96)	Tendencia.
16. Villanueva (102)	No aleatorio y persistencia.
17. Zacatecas (103)	Tendencia y cambio en la media.

Explicado el concepto de periodo de retorno de los eventos anuales, sus predicciones respectivas fueron obtenidas con base en dos modelos probabilísticos, cuya aplicación en el análisis de frecuencia ha sido establecida bajo precepto en Estados Unidos y en Inglaterra, éstos son respectivamente las distribuciones Log-Pearson tipo III (LP3) y la General de Valores Extremos (GVE), las cuales tienen tres parámetros de ajuste.

Ambos modelos probabilísticos se ajustaron con los dos métodos más comunes y consistentes; para la distribución LP3 se usó el método de momentos en el dominio logarítmico (WRC, 1977) y real (Bobée, 1975); en cambio, para el modelo GVE se empleó el método de sextiles (Clarke, 1973) y el de momentos L (Stedinger *et al.*, 1993; Hosking & Wallis, 1997).

En el cuadro 3 se indican para ambos modelos su menor error estándar de ajuste (Kite, 1977) obtenido y las predicciones asociadas con los periodos de retorno de 100, 500, 1 000, 5 000 y 10 000 años. Se han indicado con negritas el error estándar de ajuste (EEA)

del modelo LP3 cuando proviene del método de momentos en el dominio real y el de sextiles del modelo GVE, pues tales métodos son los que en menos ocasiones conducen al menor EEA. La enorme similitud que mostraron los EEA de ambos modelos probabilísticos, en los 81 registros de PMD procesados, definió que no era necesario probar y ajustar otra distribución, como por ejemplo la Logística Generalizada, recientemente establecida bajo precepto en Inglaterra (Mansell, 2003; Shaw *et al.*, 2011). En la última columna del cuadro 3 se indica qué modelo probabilístico condujo al menor EEA y por lo tanto qué predicciones son las correspondientes a cada uno de los 81 registros procesados.

Únicamente en 19 de los 81 registros procesados, la distribución Log-Pearson tipo III condujo a un menor EEA, como se observa en la última columna del cuadro 3. En relación con los ajustes de la distribución GVE, la mayoría resultó tipo I o de Gumbel, con parámetro de forma (k) cercano a cero. La tipo II o de Fréchet sólo se presentó en cinco estaciones: Corrales, El Cazadero, Mezquital del Oro, Sain Alto

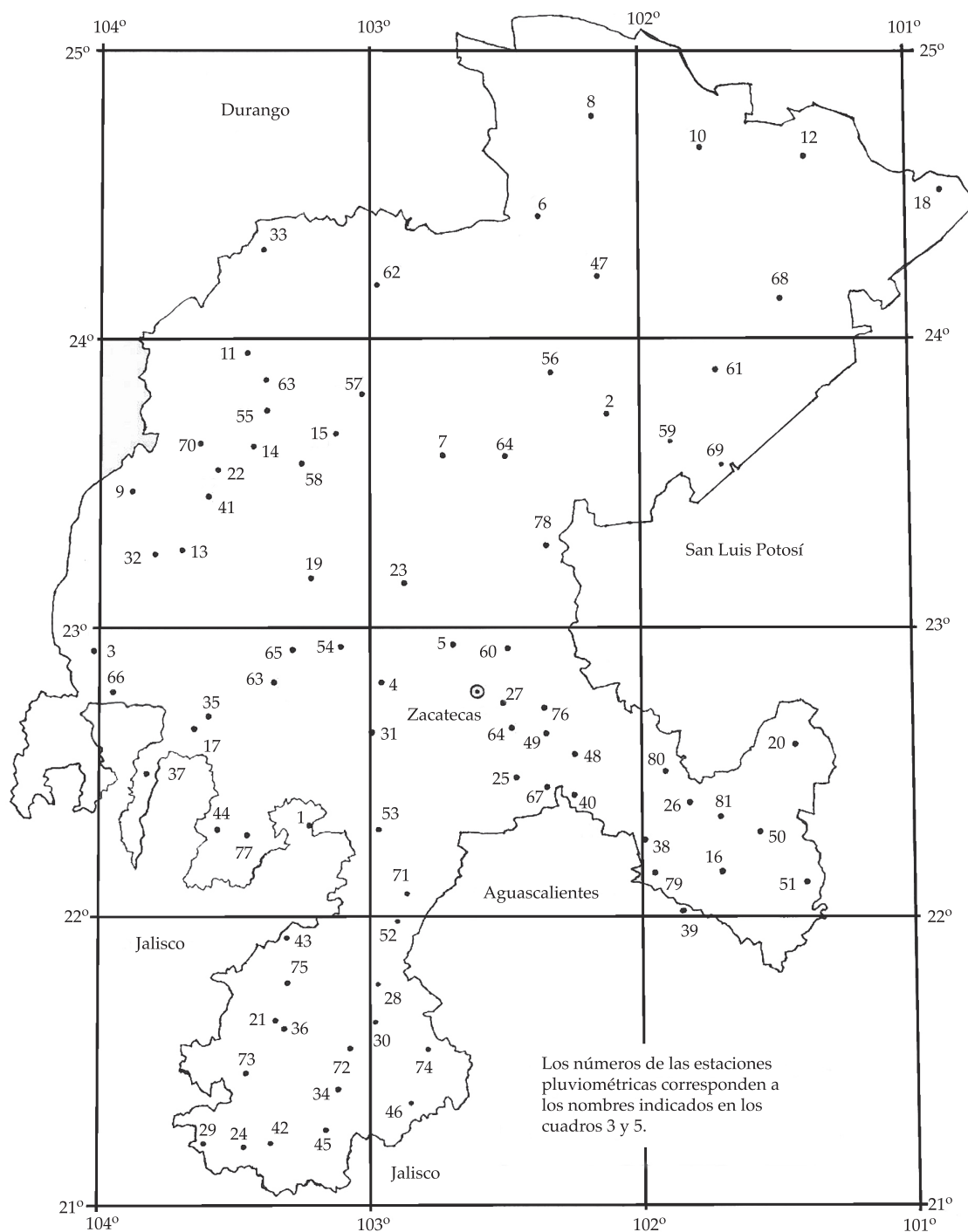


Figura 1. Localización geográfica de las 81 estaciones pluviométricas procesadas del estado de Zacatecas, México.

y Sierra Hermosa; en cambio, la tipo III o de Weibull se obtuvo en 10 estaciones: García de la Cadena, Huanusco, Mesillas, Presa El Chique,

San Antonio del Ciprés, San Pedro Piedra Gorda, Tayahua, Tecamate, Trancoso y Vicente Guerrero.

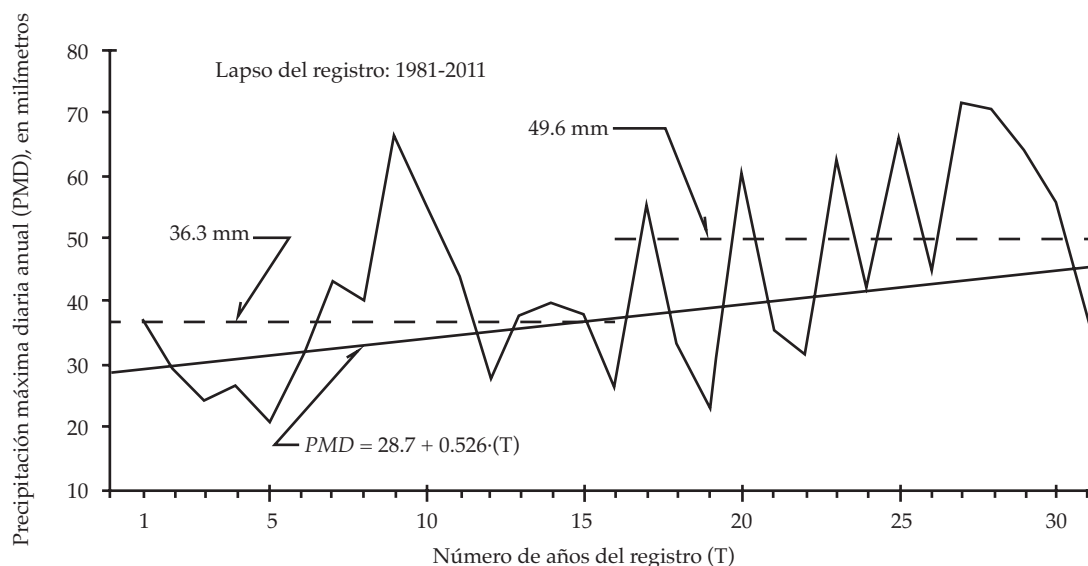


Figura 2. Serie cronológica de precipitación máxima diaria anual en la estación pluviométrica Chichimequillas del estado de Zacatecas, México.

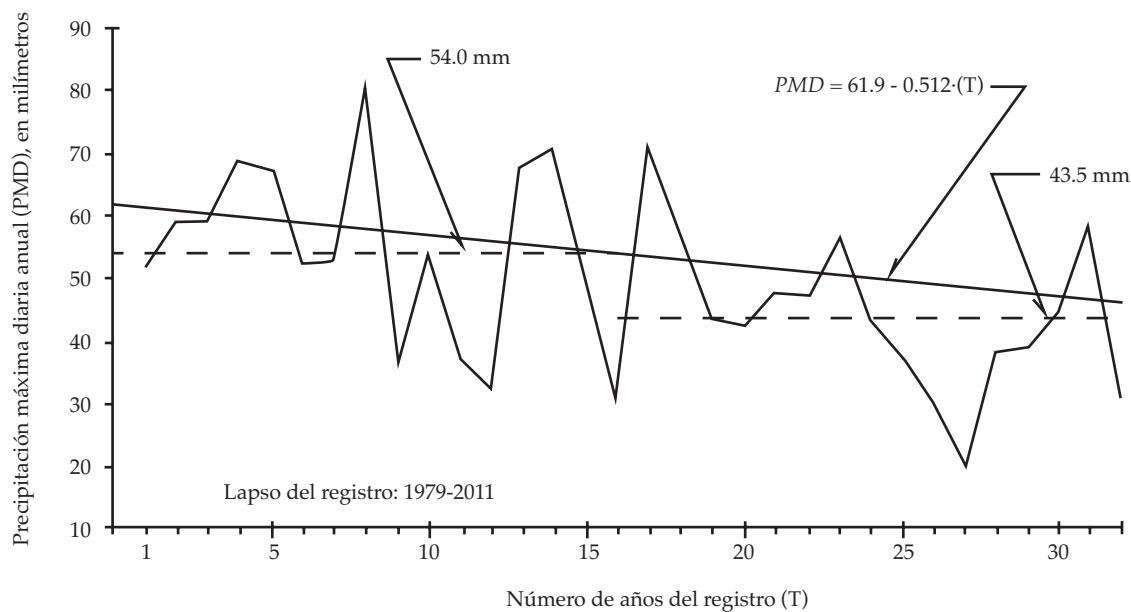


Figura 3. Serie cronológica de precipitación máxima diaria anual en la estación pluviométrica Milpillillas de Allende del estado de Zacatecas, México.

Contraste de predicciones actuales y del estudio de 1976

Weiss (1964) estableció los factores medios por los que hay que multiplicar las precipitaciones

medidas en ciertos intervalos fijos para transformarlas a los valores reales observados de lluvia de tal duración. Para que la precipitación diaria corresponda a la de 24 horas de duración se debe multiplicar por 1.13. Establecida la co-

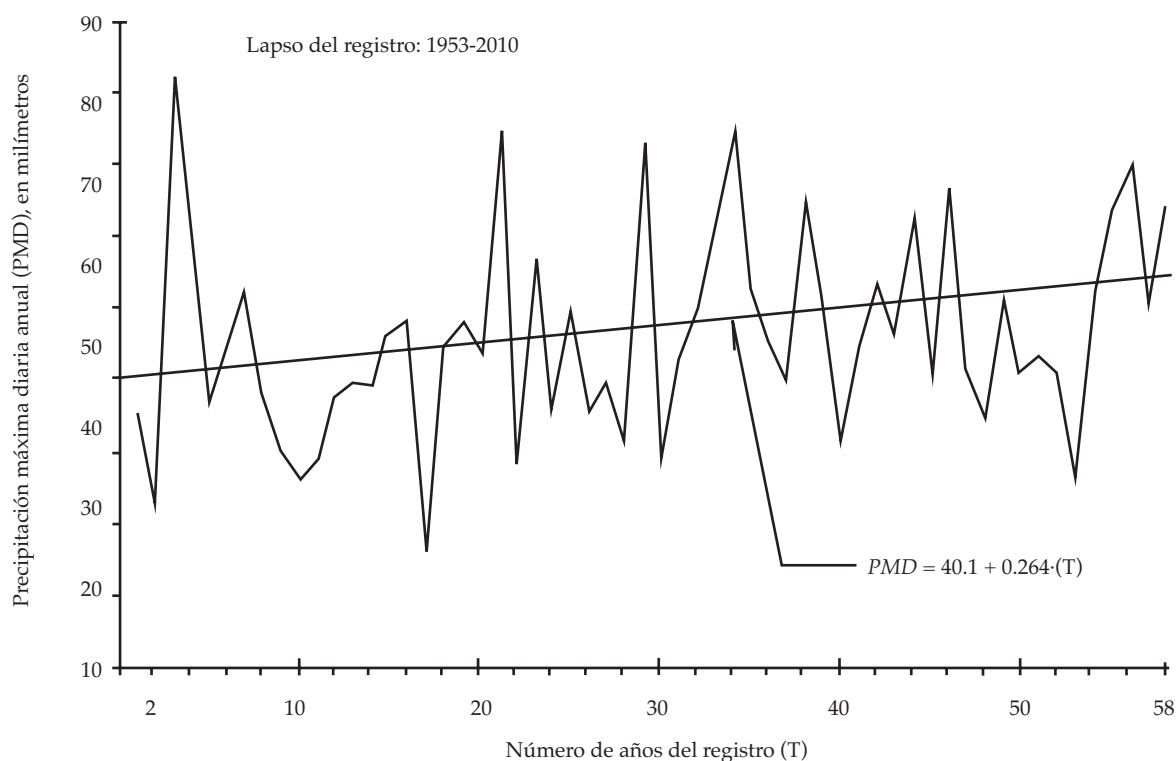


Figura 4. Serie cronológica de precipitación máxima diaria anual en la estación pluviométrica Zacatecas del estado de Zacatecas, México.

rección anterior, se procedió a encontrar estaciones pluviométricas comunes al estudio de mediados de los años setenta (SRH, 1976) que abarcó todo México y del trabajo que se expone para Zacatecas; se encontraron 46, las cuales se detallan en el cuadro 4 por regiones hidrológicas. La Región Hidrológica 12 fue subdividida en una zona del oeste, la central (Juchipila) y la del este.

En el cuadro 4 se muestran las predicciones tomadas de los mapas de curvas de isovalores (SRH, 1976) disponibles sólo en los periodos de retorno 100, 1 000 y 10 000 años; además se tienen las predicciones adoptadas entre los modelos LP3 y GVE, previamente corregidas por el factor de Weiss y por último se exponen los cocientes entre los valores citados; esto es, entre el valor reciente y el anterior o de los mapas.

Lógicamente, se observa mayor dispersión en los cocientes del periodo de retorno de 10 000 años que en aquellos asociados al de 100

años. Los cocientes mínimos se presentan en Camacho y Trancoso, y los máximos en El Cazadero y Villa de Cos. En términos generales, en las regiones hidrológicas de climas áridos o semiáridos, es decir la 36 y 37, los cocientes son próximos a la unidad y tienen sus valores más bajos en la región hidrológica 12 central. Los valores medianos de los 46 cocientes muestran gran similitud alrededor de un valor de 0.88, por lo cual se concluye que los mapas de curvas isomáximas (SRH, 1976) son todavía válidos para diseño. Tales mapas se presentan en las figuras 5, 6 y 7.

Estimación estadística de la PMP puntual

El método estadístico de David M. Hershfield para estimar la precipitación máxima probable (PMP) puede ser consultado en Hershfield (1961, 1965), WMO (1973) y Campos (1998). En el cuadro 5 se han concentrado los resultados de

Cuadro 3. Predicciones de precipitación máxima diaria anual (mm) en los periodos de retorno indicados (años), con dos modelos probabilísticos, en 81 estaciones pluviométricas del estado de Zacatecas, México.

Núm.	Estación pluviométrica	Distribución Log-Pearson tipo III (LP3)						Distribución General de Valores Extremos (GVE)						Modelo adoptado
		EEA	100	500	1 000	5 000	10 000	EEA	100	500	1 000	5 000	10 000	
1	Achimec	1.767	89.9	107.4	115.0	133.0	140.9	1.745	90.3	107.5	114.7	130.9	137.7	GVE
2	Agua Nueva	2.274	73.5	87.7	93.9	108.3	114.6	2.264	75.1	91.4	98.5	115.2	122.5	GVE
3	Ameca La Vieja	2.782	84.6	100.0	106.6	122.4	129.3	2.701	83.2	96.0	101.1	112.1	116.5	GVE
4	Boca del Tesorero	1.963	84.6	100.9	108.1	125.2	132.8	1.803	87.0	104.9	112.7	131.1	139.1	GVE
5	Calera de Víctor Rosales	1.697	77.1	90.4	96.0	109.2	114.9	1.629	77.8	90.8	96.2	108.1	113.0	GVE
6	Camacho	2.183	59.7	75.9	83.7	104.1	114.1	2.220	58.0	71.6	77.7	92.8	99.7	LP3
7	Cañitas de Felipe Pescador	2.611	91.4	117.3	129.4	159.7	173.8	2.585	92.3	119.2	131.7	163.2	177.8	GVE
8	Coapas	1.568	76.3	88.6	93.8	105.9	111.1	1.487	76.6	88.1	92.7	102.7	106.7	GVE
9	Chalchihuites	3.208	98.9	122.7	133.3	159.2	170.9	3.376	95.2	114.5	122.6	140.8	148.5	LP3
10	Cedros	1.394	66.6	83.0	90.7	110.2	119.5	1.299	68.6	87.2	96.1	119.0	129.9	GVE
11	Col. González Ortega	4.196	131.4	192.0	224.9	322.2	375.2	4.349	133.5	201.2	239.5	357.1	423.5	LP3
12	Concepción del Oro	1.829	87.8	107.9	116.5	136.9	145.8	1.914	86.7	105.7	113.6	131.9	139.5	LP3
13	Corrales	3.432	106.4	140.5	157.1	200.9	222.4	3.403	108.9	147.2	166.4	218.4	244.4	GVE
14	El Arenal	2.301	112.1	137.9	149.3	176.3	188.3	2.410	110.3	134.0	144.0	166.8	176.5	LP3
15	El Cazadero	2.345	102.7	133.1	147.5	184.7	202.4	2.226	106.3	142.6	160.4	208.2	231.9	GVE
16	El Nigromante	2.036	89.7	106.1	113.0	128.6	135.2	1.899	92.0	109.9	117.3	134.0	140.9	GVE
17	El Romerillo	2.318	90.9	109.2	117.4	137.1	146.0	2.163	89.0	103.9	110.0	123.3	128.8	GVE
18	El Salvador	3.653	102.4	126.5	137.4	164.1	176.2	3.534	107.0	136.7	150.6	185.5	201.8	GVE
19	El Sauz	1.302	73.9	88.4	94.9	110.6	117.6	1.276	73.6	87.1	92.8	105.7	111.1	GVE
20	Espíritu Santo	3.427	108.7	140.0	154.9	193.1	211.4	3.317	108.7	139.0	153.1	188.6	205.1	GVE
21	Excámé	2.233	91.9	104.4	109.5	120.9	125.6	2.193	94.6	107.9	113.1	124.3	128.6	GVE
22	Felipe Ángeles (S)	2.240	80.9	88.8	91.5	96.8	98.7	2.081	81.5	89.0	91.5	96.1	97.7	GVE
23	Fresnillo	2.756	90.2	106.9	114.0	130.3	137.4	2.759	92.9	112.7	121.3	141.2	149.8	LP3
24	García de la Cadena	3.055	89.4	96.0	98.4	103.2	104.9	3.014	88.8	94.0	95.7	98.5	99.4	GVE
25	Genaro Codina	1.811	76.2	87.9	92.9	104.5	109.6	1.625	75.2	84.6	88.2	95.6	98.4	GVE
26	Gral. Guadalupe Victoria	3.229	92.4	111.7	120.2	140.0	148.8	2.983	96.9	122.0	133.5	162.0	175.0	GVE

Cuadro 3 (continuación). Predicciones de precipitación máxima diaria anual (mm) en los periodos de retorno indicados (años), con dos modelos probabilísticos, en 81 estaciones pluviométricas del estado de Zacatecas, México.

27	Guadalupe	3.790	89.1	104.8	111.3	125.9	132.0	3.884	83.2	92.7	96.0	102.4	104.7	LP3
28	Huanusco	2.434	80.2	89.1	92.6	100.1	103.1	2.268	80.4	87.9	90.5	95.4	97.1	GVE
29	Huiztila	3.077	113.4	133.1	141.7	161.8	170.7	2.877	112.2	128.6	135.2	149.2	154.8	GVE
30	Jalpa	2.711	79.2	88.2	91.9	100.1	103.6	2.714	82.7	95.5	100.8	113.2	118.5	LP3
31	Jerez	1.700	79.0	95.7	103.3	121.8	130.3	1.598	80.3	97.4	105.0	123.1	131.2	GVE
32	Jiménez del Teúl	2.155	81.6	102.0	111.4	134.6	145.4	2.110	81.5	101.0	109.7	130.7	140.0	GVE
33	Juan Aldama	3.576	92.1	106.0	111.5	123.6	128.5	3.565	94.1	109.4	115.4	128.3	133.4	GVE
34	Juchipila	1.912	90.3	110.4	119.6	142.7	153.4	1.815	93.5	117.2	128.4	156.4	170.3	GVE
35	La Florida	1.591	81.2	95.8	102.2	117.5	124.4	1.578	80.4	93.2	98.4	110.0	114.8	GVE
36	La Villita	1.526	85.8	96.2	100.5	110.2	114.3	1.539	85.6	95.2	98.9	106.6	109.6	LP3
37	Las Ánimas	2.711	75.6	86.1	90.3	99.8	103.7	2.773	71.8	78.1	80.3	84.3	85.7	LP3
38	Loreto	3.011	105.8	126.8	135.9	157.3	166.7	2.732	110.3	136.1	147.6	175.2	187.4	GVE
39	Los Campos	3.598	102.4	123.3	132.3	153.6	162.9	3.196	110.9	142.4	157.3	195.2	213.1	GVE
40	Luis Moya	3.139	102.3	118.9	125.7	141.0	147.4	3.054	103.4	120.1	126.7	140.9	146.5	GVE
41	Mesillas	2.753	85.1	98.3	103.6	115.2	120.0	2.714	84.7	96.7	101.3	110.7	114.2	GVE
42	Mezquital del Oro	3.259	114.9	145.7	160.9	201.2	221.1	3.212	118.3	155.1	174.0	226.2	253.0	GVE
43	Momax	3.832	103.6	137.3	154.3	200.7	224.2	3.879	105.7	143.7	163.4	218.6	247.1	LP3
44	Monte Escobedo	1.172	82.8	94.8	99.9	111.8	117.0	1.030	82.2	92.2	96.0	104.1	107.2	GVE
45	Moyahua de Estrada	1.774	89.3	104.7	111.6	128.0	135.4	1.808	85.8	96.6	100.8	109.7	113.2	LP3
46	Nochistlán	2.013	99.6	117.8	125.4	142.6	150.0	1.972	100.0	117.8	125.0	140.8	147.2	GVE
47	Nuevo Mercurio	2.631	92.5	126.0	142.7	187.9	210.6	2.663	93.0	128.1	145.8	194.3	218.9	LP3
48	Ojo Caliente	2.554	88.8	105.8	113.0	129.4	136.3	2.575	86.3	100.0	105.3	116.4	120.7	LP3
49	Palmillas	3.064	88.4	105.8	113.4	131.4	139.4	3.207	87.2	103.2	109.9	125.1	131.4	LP3
50	Pinos	1.531	99.9	120.9	130.2	152.6	162.7	1.515	98.9	117.8	125.7	143.6	151.1	GVE
51	Pino Suárez	3.026	108.1	135.0	147.3	177.6	191.4	2.800	113.1	146.2	161.9	201.8	220.7	GVE
52	Presa El Chique	1.115	76.0	86.2	90.4	99.9	103.9	1.040	75.9	84.8	88.2	95.2	97.8	GVE
53	Presa Palomas	1.735	88.4	105.7	113.5	132.5	141.2	1.640	90.0	106.9	114.2	131.4	138.9	GVE
54	Presa Santa Rosa	1.885	89.5	113.4	124.7	153.6	167.3	1.834	90.4	114.6	125.9	154.4	167.7	GVE

Cuadro 3 (continuación). Predicciones de precipitación máxima diaria anual (mm) en los periodos de retorno indicados (años), con dos modelos probabilísticos, en 81 estaciones pluviométricas del estado de Zacatecas, México.

55	Puerto de San Francisco	2.472	80.5	97.1	104.7	123.5	132.2	2.631	77.6	90.1	95.3	107.1	111.9	LP3
56	Purísima de Sifuentes	3.790	99.5	128.2	141.6	175.4	191.2	3.827	98.9	127.0	139.9	172.1	186.9	LP3
57	Río Grande	2.485	103.6	134.9	149.8	187.9	206.0	2.421	104.6	137.3	152.9	192.9	211.9	GVE
58	Sain Alto	3.671	102.3	133.8	149.3	190.4	210.6	3.653	105.3	142.6	161.7	214.3	241.2	GVE
59	San Andrés	2.471	110.3	135.4	146.3	172.0	183.3	2.633	112.3	140.4	152.8	182.5	195.7	LP3
60	San Antonio del Ciprés	2.732	83.9	96.0	100.8	111.6	116.0	2.612	84.6	95.9	100.2	109.0	112.3	GVE
61	San Benito	4.202	104.1	123.2	131.0	148.1	155.2	4.065	115.4	145.5	158.9	191.0	205.2	GVE
62	San Gil	1.731	81.7	98.8	106.0	122.5	129.6	1.718	81.2	97.6	104.4	119.4	125.6	GVE
63	San Isidro de los González	1.519	77.5	94.1	101.5	119.8	128.2	1.325	78.7	95.3	102.6	119.9	127.6	GVE
64	San Jerónimo	1.638	77.0	90.3	96.0	109.0	114.6	1.500	76.3	87.6	92.0	101.4	105.1	GVE
65	San José de Llanetes	2.774	86.7	115.8	130.6	171.1	191.8	2.803	88.3	120.7	137.6	185.4	210.3	LP3
66	San Pedro de la Sierra	2.410	82.8	94.4	99.1	109.4	113.6	2.267	86.1	99.6	105.0	116.5	121.1	GVE
67	San Pedro Piedra Gorda	2.096	67.4	73.0	75.0	78.9	80.4	2.084	67.6	72.7	74.3	77.3	78.3	GVE
68	San Tiburcio	2.439	90.7	112.0	121.5	144.4	154.7	2.345	92.2	114.5	124.4	148.0	158.4	GVE
69	Sierra Hermosa	4.015	131.4	180.2	204.3	268.9	300.9	3.962	128.6	174.0	196.2	254.7	283.3	GVE
70	Sombrerete	2.198	83.8	103.5	112.5	134.4	144.4	2.092	83.8	102.3	110.3	129.2	137.4	GVE
71	Tayahua	2.232	78.7	90.1	94.8	105.4	109.8	2.188	77.7	87.0	90.4	97.5	100.1	GVE
72	Tecomate	1.179	78.8	90.1	94.8	105.6	110.3	1.105	78.0	87.3	90.8	98.1	100.8	GVE
73	Teúl de González Ortega	2.179	96.7	112.3	118.8	133.6	140.0	2.020	100.0	118.1	125.6	142.6	149.7	GVE
74	Tlachichila	3.142	102.7	124.4	134.3	159.1	170.6	2.982	106.3	132.1	144.3	175.0	189.4	GVE
75	Tlaltenango	1.671	95.4	112.1	119.3	136.7	144.5	1.577	94.6	108.8	114.6	127.3	132.4	GVE
76	Trancoso	1.100	70.7	75.0	76.4	78.9	79.8	1.012	69.3	72.5	73.4	74.8	75.2	GVE
77	Vicente Guerrero	2.417	76.1	81.7	83.7	87.6	89.0	2.229	80.0	87.5	90.1	95.0	96.7	GVE
78	Villa de Cos	1.836	104.6	125.9	135.1	156.8	166.3	1.807	104.7	125.4	134.0	153.6	161.7	GVE
79	Villa García	2.086	94.5	110.4	117.1	132.1	138.4	1.991	93.7	108.0	113.5	125.1	129.6	GVE
80	Villa González Ortega	2.142	83.2	100.3	107.8	125.7	133.7	1.981	81.8	96.0	101.8	114.6	119.8	GVE
81	Villa Hidalgo	2.449	97.8	116.2	124.0	141.7	149.3	2.267	100.1	120.1	128.4	147.2	155.1	GVE

Simbología: EEA error estándar de ajuste, en milímetros.

Cuadro 4. Contraste de predicciones de lluvia en 24 horas con periodos de retorno de 100, 1 000 y 10 000 años, en 46 estaciones pluviométricas comunes a los estudios de 1976 y actual.

Núm.	Estación pluviométrica	Boletín de tormentas			Estimación probabilística			Cocientes: VR/VA*		
		100	1 000	10 000	100	1 000	10 000	100	1 000	10 000
Región Hidrológica núm. 36										
1	Cedros	125	170	225	77.5	108.6	146.8	0.620	0.639	0.652
2	Juan Aldama	100	125	175	106.3	130.4	150.7	1.063	1.043	0.861
3	San Gil	115	155	190	91.8	118.0	141.9	0.798	0.761	0.747
4	Río Grande	105	150	180	118.2	172.8	239.4	1.126	1.152	1.330
5	El Cazadero	100	125	175	120.1	181.3	262.0	1.201	1.450	1.497
6	El Arenal	125	170	200	126.7	168.7	212.8	1.014	0.992	1.064
7	Sain Alto	115	155	200	119.0	182.7	272.6	1.035	1.179	1.363
8	El Sauz	100	125	150	83.2	104.9	125.5	0.832	0.839	0.837
9	Presa Santa Rosa	100	125	150	102.2	142.3	189.5	1.022	1.138	1.263
Región Hidrológica núm. 37										
10	Concepción del Oro	100	150	180	99.2	131.6	164.8	0.992	0.877	0.916
11	Camacho	125	175	225	67.5	94.6	128.9	0.540	0.541	0.573
12	Nuevo Mercurio	100	150	190	104.5	161.3	238.0	1.045	1.075	1.253
13	San Tiburcio	100	125	180	104.2	140.6	179.0	1.042	1.125	0.994
14	San Benito	130	200	250	130.4	179.6	231.9	1.003	0.898	0.928
15	Agua Nueva	100	125	150	84.9	111.3	138.4	0.849	0.890	0.923
16	Guadalupe	100	140	175	100.7	125.8	149.2	1.007	0.899	0.853
17	Cañitas de Felipe P.	100	150	200	104.3	148.8	200.9	1.043	0.992	1.005
18	Villa de Cos	100	125	150	118.3	151.4	182.7	1.183	1.211	1.218
19	Fresnillo	100	125	150	101.9	128.8	155.3	1.019	1.030	1.035
20	Calera de Víctor R.	100	125	150	87.9	108.7	127.7	0.879	0.870	0.851
21	San Antonio del Ciprés	100	125	150	95.6	113.2	126.9	0.956	0.906	0.846
22	Villa Hidalgo	125	200	250	113.1	145.1	175.3	0.905	0.726	0.701
23	Pinos	105	150	190	111.8	142.0	170.7	1.065	0.947	0.898
Región Hidrológica núm. 11										
24	Sombrerete	130	175	220	94.7	124.6	155.3	0.728	0.712	0.706
25	Chalchihuites	150	200	275	111.8	150.6	193.1	0.745	0.753	0.702
Región Hidrológica núm. 12 (oeste)										
26	Jiménez del Teúl	125	150	200	92.1	124.0	158.2	0.737	0.827	0.791
27	San José de Llanetes	120	150	200	98.0	147.6	216.7	0.817	0.984	1.084
28	Achimec	125	150	200	102.0	129.6	155.6	0.816	0.864	0.778
29	Monte Escobedo	125	150	200	92.2	108.5	121.1	0.738	0.723	0.606
Región Hidrológica núm. 12 (central)										
30	Boca del Tesorero	100	150	160	98.3	127.4	157.2	0.983	0.849	0.983
31	Presa Palomas	100	150	160	101.7	129.0	157.0	1.017	0.860	0.981
32	Tayahua	100	150	160	87.8	102.2	113.1	0.878	0.681	0.707
33	Presa El Chique	100	150	160	85.8	99.7	110.5	0.858	0.665	0.691
34	Tlaltenango	125	150	200	106.9	129.5	149.6	0.855	0.863	0.748
35	Excamé	125	150	200	106.9	127.8	145.3	0.855	0.852	0.727
36	La Villita	125	150	200	97.0	113.6	129.2	0.776	0.757	0.646
37	Tecomate	125	150	200	88.1	102.6	113.9	0.705	0.684	0.570

Cuadro 4 (continuación). Contraste de predicciones de lluvia en 24 horas con periodos de retorno de 100, 1 000 y 10 000 años, en 46 estaciones pluviométricas comunes a los estudios de 1976 y actual.

38	Teúl de González O.	125	150	200	113.0	141.9	169.2	0.904	0.946	0.846
39	Juchipila	125	150	200	105.7	145.1	192.4	0.846	0.967	0.962
40	Nochistlán	125	150	200	113.0	141.3	166.3	0.904	0.942	0.831
Región Hidrológica núm. 12 (este)										
41	Trancoso	120	150	170	78.3	82.9	85.0	0.653	0.553	0.500
42	Ojo Caliente	125	170	200	100.3	127.7	154.0	0.802	0.751	0.770
43	San Pedro Piedra G.	100	125	160	76.4	84.0	88.5	0.764	0.672	0.553
44	Mesillas	100	130	150	95.7	114.5	129.0	0.957	0.881	0.860
45	Loreto	100	150	200	124.6	166.8	211.8	1.246	1.112	1.059
46	Villa García	120	150	200	105.9	128.3	146.4	0.883	0.855	0.732
Valor mínimo		100	125	150	67.5	82.9	85.0	0.540	0.541	0.500
Valor máximo		150	200	275	130.4	182.7	272.6	1.246	1.450	1.497
Valor de la media aritmética		-	-	-	-	-	-	0.907	0.890	0.879
Valor mediano muestral		-	-	-	-	-	-	0.893	0.873	0.848
Valor mediano poblacional		-	-	-	-	-	-	0.898	0.878	0.861

valor reciente (VR), valor anterior (VA).



Figura 5. Curvas isomáximas de periodo de retorno de cien años del estado de Zacatecas (SRH, 1976).



Figura 6. Curvas isomáximas de periodo de retorno de mil años del estado de Zacatecas (SRH, 1976).

la aplicación de este método en los 81 registros de *PMD*. Se observa que las estimaciones de *PMP* muestran gran variabilidad, fluctuando de 196.5 mm en Camacho a 507.0 mm en Sierra Hermosa; ambas estaciones pertenecientes a la Región Hidrológica núm. 37, sin embargo su altitud es bastante diferente, con 1 658 msnm en Camacho y 2 100 msnm en Sierra Hermosa.

Cocientes de la PMP puntual

En las dos últimas columnas del cuadro 5 se presentan los cocientes de la *PMP* a la máxima precipitación diaria anual observada (P_o) y a la predicción de *PMD* de 10 000

años (P_{Tr}). La media aritmética, la moda y la mediana poblacional del primer cociente son, respectivamente, 4.177, 4.117 y 4.157; en cambio, para el segundo cociente son 2.158, 2.044 y 2.120. La moda y la mediana se obtuvieron con base en la distribución Gamma Mixta. Entonces un valor de 4.20 veces la P_o y otro de 2.20 por la P_{Tr} conducirá a estimaciones rápidas y aproximadas de la *PMP* puntual de 24 horas de duración. Para estimaciones más precisas se pueden construir curvas de isovalores de *PMP*, o bien realizar un transporte ponderado al sitio de interés, empleando las magnitudes del cuadro 5 que sean cercanas y pertenezcan a la misma zona geográfica.

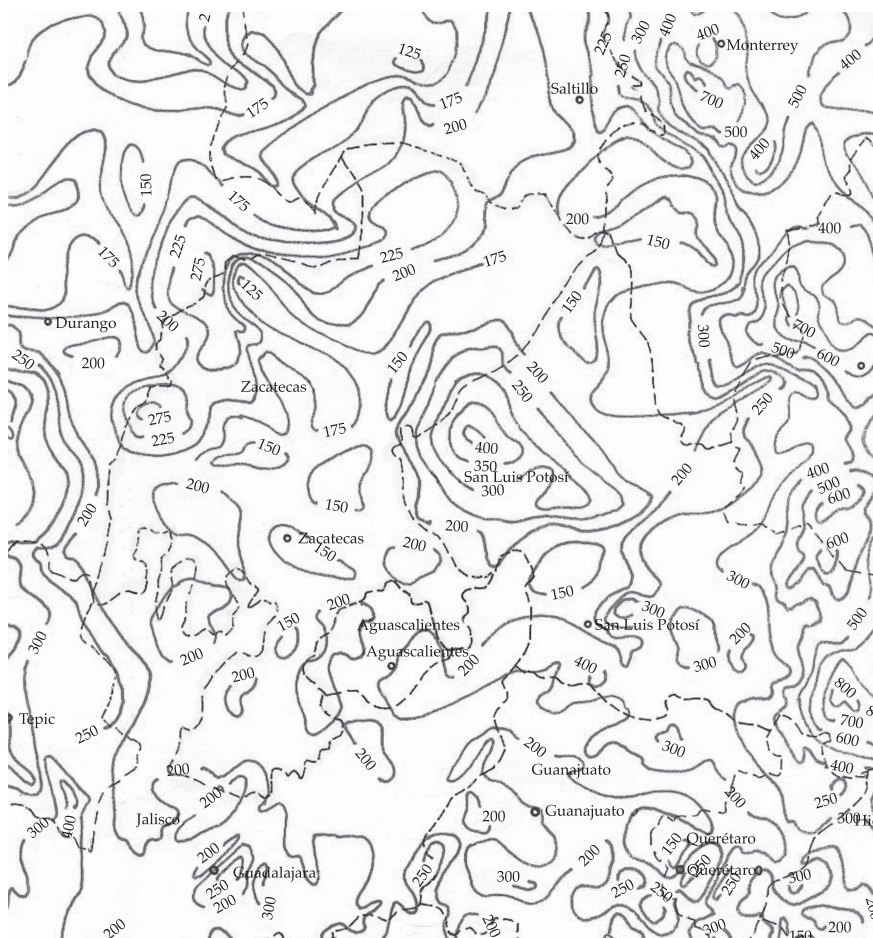


Figura 7. Curvas isomáximas de periodo de retorno de diez mil años del estado de Zacatecas (SRH, 1976).

Estimación de la PMP para un área y diversas duraciones

Ha sido establecido que los valores puntuales de *PMP* obtenidos al aplicar el método de Hershfield a un registro pluviométrico de *PMD* son representativos de un área de 25 km². Entonces, para estimar la *PMP* correspondiente a una cierta área o cuenca (*A*) mayor de 25 km², se debe aplicar un factor de reducción por área (*FRA*), ya que todas las tormentas son menores conforme abarcan más extensión. La WMO (1973) presentó unas curvas promedio de reducción por área, obtenidas a partir de análisis P-A-D de grandes tormentas de tipo general. La curva relativa a la duración de 24

horas ha sido representada por el siguiente polinomio de 4° grado:

$$FRA = 1.012021 - 5.985305 \cdot 10^{-4} \cdot A + 1.39148 \cdot 10^{-6} \cdot A^2 - 1.548155 \cdot 10^{-9} \cdot A^3 + 6.121556 \cdot 10^{-13} \cdot A^4 \quad (1)$$

en la cual, el área *A* está en km². La expresión anterior se obtuvo con base en 11 puntos y tiene un coeficiente de determinación de 0.99874 y un error estándar de la estimación de 0.00257 (Campos, 1998).

En cuencas grandes, donde es común tener dentro de ella varias estaciones pluviométricas, primero se debe obtener el valor ponderado de *PMP* puntual, por ejemplo, por medio del

Cuadro 5. Resultados de la aplicación del método estadístico de D. M. Hershfield para estimar la PMP (mm) en 24 horas puntual, en las 81 estaciones pluviométricas indicadas del estado de Zacatecas.

Núm.	Estación pluviométrica	Medias (mm)		D. E. ¹ (mm)		F. E. ²		PMP ³ (mm)	Cocientes ⁴	
		$\bar{X}_n$	$\bar{X}_{n-m}$	S_n	S_{n-m}	Km_o	Km		PMP/P _o	PMP/P _{Tr}
1	Achimec	44.668	43.896	14.494	13.566	2.846	17.565	344.7	4.178	2.215
2	Agua Nueva	36.316	35.371	12.174	10.606	3.831	17.968	278.9	3.670	2.015
3	Ameca La Vieja	44.467	43.483	12.909	11.938	2.473	17.534	330.0	4.521	2.507
4	Boca del Tesorero	43.595	42.702	13.170	11.902	3.302	17.610	309.9	3.779	1.972
5	Calera de Víctor Rosales	40.998	40.378	12.095	11.369	2.781	17.736	295.0	4.097	2.310
6	Camacho	28.848	27.843	8.674	6.740	4.622	18.327	196.5	3.331	1.524
7	Cañitas de Felipe Pescador	37.476	36.433	15.357	14.185	2.719	17.903	370.4	4.939	1.844
8	Coapas	41.634	40.980	11.667	11.028	2.432	17.688	293.8	4.333	2.437
9	Chalchihuites	43.653	42.330	16.837	14.343	4.335	17.634	360.6	3.451	1.867
10	Cedros	32.834	32.086	9.814	8.784	3.235	18.124	241.7	3.995	1.647
11	Col. González Ortega	47.770	46.153	19.925	17.573	3.406	17.428	449.1	4.237	1.059
12	Concepción del Oro	37.300	36.304	15.627	14.213	3.292	17.929	356.2	4.286	2.162
13	Corrales	44.027	42.525	17.048	14.937	3.319	17.592	395.7	4.296	1.433
14	El Arenal	48.962	47.618	19.395	17.723	2.956	17.364	448.3	4.483	2.107
15	El Cazadero	42.905	41.931	17.056	15.596	3.435	17.666	386.1	4.043	1.473
16	El Nigromante	42.786	41.493	15.628	14.247	2.633	17.627	384.6	4.868	2.416
17	El Romerillo	46.427	45.331	13.734	12.572	2.614	17.444	345.4	4.417	2.373
18	El Salvador	46.812	45.075	16.919	14.832	2.928	17.431	404.3	4.568	1.773
19	El Sauz	38.473	38.031	11.060	10.542	2.767	17.868	271.6	4.042	2.163
20	Espíritu Santo	46.957	45.548	17.153	15.742	2.506	17.424	421.7	4.961	1.820
21	Excamé	52.759	52.309	14.089	13.713	2.165	17.195	345.4	4.212	2.377
22	Felipe Ángeles (S)	43.973	42.672	15.185	13.940	2.427	17.555	381.3	4.984	3.454
23	Fresnillo	43.900	43.102	15.519	14.506	2.971	17.609	363.2	4.213	2.339
24	García de la Cadena	57.700	56.754	13.680	13.019	1.962	16.888	363.2	4.413	3.234
25	Genaro Codina	43.532	42.670	10.905	10.095	2.390	17.565	288.2	4.314	2.592
26	Gral. Guadalupe Victoria	43.460	42.277	15.828	13.854	3.842	17.633	351.3	3.679	1.776
27	Guadalupe	43.129	41.700	15.846	13.938	3.178	17.625	374.9	4.359	2.513
28	Huanusco	48.131	47.477	12.348	11.880	1.980	17.363	323.2	4.552	2.946
29	Huitzila	61.652	60.117	16.736	15.192	2.527	16.719	416.1	4.224	2.379
30	Jalpa	50.335	49.567	10.547	9.696	2.695	17.257	277.2	3.662	2.368
31	Jerez	40.793	40.098	11.682	10.912	2.676	17.733	289.4	4.176	1.952
32	Jiménez del Teúl	36.937	35.910	13.321	11.781	3.488	17.936	309.9	4.025	1.959
33	Juan Aldama	46.824	45.818	16.170	15.303	2.234	17.436	403.4	5.043	2.676
34	Juchipila	46.547	45.795	13.206	11.977	3.707	17.488	308.1	3.416	1.601
35	La Florida	44.211	43.600	11.930	11.177	2.899	17.584	291.7	3.838	2.249
36	La Villita	53.868	53.325	11.119	10.495	2.742	17.129	282.2	3.437	2.185
37	Las Ánimas	42.607	41.341	11.918	10.044	3.530	17.631	286.2	3.727	2.442
38	Loreto	51.150	49.931	17.846	15.995	3.505	17.271	398.8	3.762	1.883
39	Los Campos	48.907	47.197	17.404	14.928	3.437	17.354	400.4	4.065	1.663
40	Luis Moya	51.744	50.285	17.397	15.966	2.469	17.191	429.0	4.783	2.591
41	Mesillas	42.687	41.231	14.972	12.897	3.386	17.644	351.5	4.140	2.724
42	Mezquital del Oro	59.011	57.346	15.218	12.767	3.521	16.860	357.4	3.494	1.250
43	Momax	46.424	45.025	14.865	13.398	2.610	17.433	370.5	4.631	1.462

Cuadro 5 (continuación). Resultados de la aplicación del método estadístico de D. M. Hershfield para estimar la PMP (mm) en 24 horas puntual, en las 81 estaciones pluviométricas indicadas del estado de Zacatecas.

44	Monte Escobedo	49.477	48.784	11.275	10.415	2.930	17.321	280.6	3.538	2.316
45	Moyahua de Estrada	50.884	49.913	12.193	11.117	2.706	17.229	312.7	3.909	2.044
46	Nochistlán	47.986	47.056	17.230	15.846	3.404	17.427	391.4	3.875	2.353
47	Nuevo Mercurio	35.263	34.162	14.864	13.406	3.121	18.019	349.9	4.604	1.470
48	Ojo Caliente	41.632	40.706	15.817	14.548	3.182	17.719	365.1	4.197	2.370
49	Palmillas	44.489	43.046	14.208	12.308	3.165	17.542	341.5	4.165	2.168
50	Pinos	48.876	48.044	15.921	14.814	3.089	17.377	370.9	3.954	2.172
51	Pino Suárez	48.050	46.274	17.969	15.608	3.186	17.389	418.6	4.360	1.678
52	Presa El Chique	44.381	43.850	11.316	10.647	2.945	17.580	278.7	3.706	2.522
53	Presa Palomas	47.966	47.247	12.458	11.644	2.718	17.393	306.4	3.883	1.952
54	Presa Santa Rosa	41.210	40.590	13.816	13.033	2.947	17.740	327.8	4.149	1.730
55	Puerto de San Francisco	43.468	42.403	11.369	9.279	4.591	17.616	256.5	3.018	1.717
56	Purísima de Sifuentes	40.257	38.181	17.169	13.447	4.322	17.787	365.6	3.796	1.692
57	Río Grande	41.811	40.472	17.270	15.447	3.206	17.703	400.2	4.447	1.671
58	Sain Alto	44.760	42.833	15.770	12.754	3.777	17.541	354.3	3.893	1.300
59	San Andrés	47.319	46.014	19.406	18.015	2.608	17.432	461.4	4.961	2.228
60	San Antonio del Ciprés	44.905	43.867	14.117	12.803	3.002	17.538	341.0	4.143	2.687
61	San Benito	46.175	44.700	20.032	18.800	2.197	17.466	493.3	5.736	2.127
62	San Gil	35.464	34.306	14.806	13.265	3.143	18.008	350.0	4.605	2.466
63	San Isidro de los González	39.327	38.306	11.685	10.267	3.282	17.800	285.4	3.964	1.979
64	San Jerónimo	40.007	39.007	12.276	11.182	2.682	17.755	310.3	4.497	2.613
65	San José de Llanetes	38.340	37.207	12.583	11.139	3.052	17.845	308.5	4.333	1.423
66	San Pedro de la Sierra	44.540	43.396	13.802	12.831	2.229	17.514	356.6	4.953	2.606
67	San Pedro Piedra Gorda	41.535	40.961	11.066	10.078	3.874	17.728	262.7	3.284	2.969
68	San Tiburcio	40.135	39.028	15.419	14.067	2.913	17.775	368.3	4.604	2.058
69	Sierra Hermosa	46.672	45.016	21.496	19.667	2.694	17.467	507.0	5.173	1.584
70	Sombrerete	38.650	37.237	13.602	11.579	3.417	17.835	320.9	4.178	2.067
71	Tayahua	43.939	43.074	12.314	11.027	3.448	17.592	290.9	3.587	2.572
72	Tecomate	45.962	45.339	11.333	10.550	2.954	17.497	280.0	3.660	2.458
73	Teúl de González Ortega	51.566	50.602	15.584	14.381	2.948	17.236	366.7	3.943	2.168
74	Tlachichila	54.680	52.883	14.556	11.700	3.839	17.055	333.4	3.409	1.558
75	Tlaltenango	53.143	52.433	13.599	12.633	3.148	17.175	325.9	3.535	2.178
76	Trancoso	44.004	43.523	12.208	11.797	2.202	17.589	304.8	4.386	3.587
77	Vicente Guerrero	47.408	46.425	12.597	11.849	2.074	17.366	334.4	4.710	3.060
78	Villa de Cos	49.276	48.118	17.678	16.065	3.242	17.354	400.9	4.001	2.194
79	Villa García	47.523	46.857	15.871	15.277	2.268	17.428	381.8	4.685	2.607
80	Villa González Ortega	40.713	39.760	13.212	12.307	2.400	17.721	336.1	4.850	2.483
81	Villa Hidalgo	46.470	45.255	17.271	15.510	3.369	17.486	391.1	4.011	2.232
Valor mínimo		28.848	27.843	8.674	6.740	1.962	16.719	196.5	3.018	1.059
Valor máximo		61.652	60.117	21.496	19.667	4.622	18.327	507.0	5.736	3.587

Simbología:

¹ desviaciones estándar.² factores de frecuencia (Km_o = máximo observado y Km = calculado).³ precipitación máxima probable en 24 horas puntual.⁴ P_o = valor máximo observado de precipitación máxima diaria anual. P_{tr} = precipitación máxima en 24 horas con periodo de retorno (T_r) de 10 000 años.

método de las curvas isoyetas, los polígonos de Thiessen o alguna otra técnica más adecuada.

Para distribuir en otras duraciones la *PMP* en 24 horas puntual o de un área, se puede utilizar el criterio propuesto por Schulz (1976), el cual consiste en trazar en un papel logarítmico una recta paralela a la curva envolvente de valores máximos mundiales, en la duración de 24 horas y el valor de la *PMP*. La curva envolvente es una recta en el papel logarítmico, cuya ecuación es (WMO, 1973; Linsley *et al.*, 1988):

$$P_{MM} = 421.64 \cdot D^{0.475} \quad (2)$$

en donde P_{MM} es la precipitación máxima mundial en milímetros de duración D en horas. Por ejemplo, para obtener la *PMP* en seis horas, siendo la de 24 horas de 513.0 mm, el procedimiento es el siguiente:

$$\alpha = \frac{513.0}{(24)^{0.475}} = \frac{513.0}{4.52481} \approx 113.375$$

$$PMP_6 = 113.375 \cdot (6)^{0.475} \approx 265.5 \text{ mm}$$

Análisis regional de frecuencia en la zona geográfica de Juchipila

El objetivo fundamental del procesamiento regional de la información de *PMD* disponible radica en permitir efectuar predicciones en sitios sin información o en aquellos que fueron descartados porque sus registros no eran homogéneos, pero ambos ubicados dentro de tal región o zona geográfica. En general, para poder realizar tales estimaciones en localidades sin datos, se deben cumplir ciertos requisitos estadísticos, por ello el análisis regional de frecuencia (ARF) primero verifica que los registros no sean discordantes entre ellos, después prueba la homogeneidad hidrológica regional y luego define predicciones adimensionales, que son válidas dentro de tal área, de manera que después con sólo escalarlas se obtienen las predicciones

buscadas. Como los análisis posteriores se basan en los momentos L y sus cocientes, se recomienda consultar a Stedinger *et al.* (1993), Hosking y Wallis (1997), o Campos (2010), para disponer de sus ecuaciones de cálculo.

Para la zona geográfica del estado de Zacatecas que es atravesada por el río Juchipila en la Región Hidrológica núm. 12 Parcial (río Santiago) se detectaron 14 estaciones pluviométricas, para las cuales se les calcularon sus cocientes de momentos L . Las magnitudes de los cocientes citados se tienen en el cuadro 6, en el cual además se expone el valor obtenido para la Discordancia (D_i) de la prueba estadística respectiva (Hosking & Wallis, 1997; Campos, 2010). Se observa que únicamente la estación García de la Cadena es discordante con el resto y por ello se elimina del ARF.

A continuación se probó la homogeneidad hidrológica de la región a través del nuevo Test de Langbein (Fill & Stedinger, 1995; Campos, 2012), encontrándose que sólo las estaciones La Villita y Nochistlán quedan fuera de las curvas de control de la prueba, la primera por arriba y la segunda por abajo. Como tal número de estaciones dispersas es admisible, se acepta que la región analizada es homogénea. En seguida se aplicó el método regional de las estaciones-años (Garros-Berthet, 1994; Campos, 2008) a los 13 registros conjuntados, previamente escalados por su media aritmética. El nuevo registro de valores adimensionales tiene 544 elementos. En el cuadro 7 se han concentrado las predicciones adimensionales obtenidas con los dos modelos probabilísticos ya utilizados y menor *EEA*.

Ahora, en el cuadro 8 se muestran los momentos L (Hosking & Wallis, 1997; Campos, 2010) de los 13 registros procesados en la región de Juchipila, para obtener sus valores adimensionales con respecto a l_1 y luego los ponderados con respecto a la amplitud de cada registro (n). Habiendo obtenido los momentos L adimensionales ponderados (le_i), se aplica la distribución GVE, para obtener las predicciones adimensionales con tal método (Campos, 2008); los resultados se muestran en el último renglón

Cuadro 6. Cocientes de momentos L y discordancias de los registros de PMD en dos regiones geográficas del estado de Zacatecas, México.

Estaciones de la región de Juchipila	t	t_3	t_4	D_i	Estaciones de la Región Hidrológica núm. 37	t	t_3	t_4	D_i
1. Excamé	0.15277	0.12216	0.04587	0.63	1. Agua Nueva	0.18368	0.13450	0.16887	0.44
2. García de la Cadena	0.13455	0.01033	0.16733	3.11	2. Calera de Víctor R.	0.16385	0.15786	0.16759	0.97
3. Huanusco	0.14845	0.06257	0.00533	1.28	3. Camacho	0.16171	0.20173	0.12884	1.27
4. Huitzila	0.15598	0.12714	0.06746	0.35	4. Cañitas de Felipe P.	0.22715	0.21471	0.13823	0.85
5. Jalpa	0.11391	0.16296	0.21525	1.19	5. Coapas	0.15869	0.13002	0.13348	0.63
6. Juchipila	0.15428	0.20720	0.16859	0.25	6. Concepción del O.	0.23536	0.15926	0.10614	1.67
7. La Villita	0.11611	0.11242	0.13096	0.72	7. El Salvador	0.19906	0.21614	0.18622	0.80
8. Los Campos	0.19337	0.22281	0.21185	1.68	8. Fresnillo	0.19482	0.12217	0.16558	0.47
9. Mezquital del Oro	0.13810	0.27106	0.21152	1.39	9. Gral. Guadalupe V.	0.19497	0.20525	0.20923	1.35
10. Moyahua de Estrada.	0.13615	0.16536	0.10380	0.41	10. Guadalupe	0.20361	0.06694	0.17305	1.82
11. Nochistlán	0.20191	0.13691	0.09829	1.66	11. Nuevo Mercurio	0.22853	0.26452	0.14582	1.43
12. Teúl de González O.	0.16853	0.15395	0.16774	0.41	12. Pinos	0.18295	0.15597	0.10857	0.16
13. Tlachichila	0.14511	0.21936	0.20266	0.50	13. San Antonio del C.	0.17838	0.10181	0.07163	0.73
14. Tlaltenango	0.14496	0.13778	0.06988	0.43	14. San Benito	0.24664	0.18817	0.06252	1.81
					15. San Jerónimo	0.17574	0.11915	0.09293	0.32
					16. San Tiburcio	0.21435	0.18565	0.11888	0.47
					17. Trancoso	0.15971	-0.03596	0.09517	3.05
					18. Villa de Cos	0.20161	0.15431	0.12490	0.10
					19. Villa González O.	0.18662	0.13979	0.05099	1.37
					20. Villa Hidalgo	0.20729	0.15366	0.15673	0.29

Cuadro 7. Predicciones adimensionales obtenidas con los métodos regionales indicados en la región geográfica de Juchipila del estado de Zacatecas, México.

Método regional, distribución de probabilidades y método de ajuste	Periodos de retorno en años				
	100	500	1 000	5 000	10 000
Estaciones-años. LP3. Mo. dominio real	1.797	2.078	2.196	2.469	2.586
Estaciones-años. GVE. Sextiles.	1.820	2.101	2.215	2.464	2.565
Mo. Ponderados. GVE. Momentos L .	1.843	2.170	2.309	2.625	2.760

del cuadro 7. Se observa que estas últimas predicciones adimensionales son las mayores y por seguridad son las adoptadas.

Por último, en el cuadro 9 se muestran las predicciones estimadas con el método regional, para las siguientes tres estaciones pluviométricas: (1) García de la Cadena, la cual fue eliminada con la prueba de discordancias; (2) Tecomate, que no se incluyó a propósito desde el inicio del ARF, y (3) el sitio de Tepechitlán, que no cuenta con estación pluviométrica, pero que es una ciudad importante. En los tres

casos, la magnitud media de la PMD se estimó con base en los valores observados cercanos. También se puede aplicar una ponderación en función de la distancia de cada estación pluviométrica al sitio bajo análisis.

Para fines de comparación entre las predicciones históricas (H) y las regionales (R) se estimó el error relativo (ER) definido como:

$$ER = \frac{(PMD_{Tr})_{regional} - (PMD_{Tr})_{histórico}}{(PMD_{Tr})_{histórico}} 100 \quad (3)$$

Cuadro 8. Ponderación de los momentos L en los 13 registros de precipitación máxima diaria anual de la región geográfica de Juchipila del estado de Zacatecas, México.

Estación	n	l_1	l_2	l_3	le_2	le_3	le_2	le_3
1. Excamé	66	52.759	8.060	0.985	0.1528	0.0187	0.0185	0.0023
2. Huanusco	36	48.131	7.145	0.447	0.1484	0.0093	0.0098	0.0006
3. Huitzila	25	61.652	9.617	1.223	0.1560	0.0198	0.0072	0.0009
4. Jalpa	34	50.335	5.734	0.934	0.1139	0.0186	0.0071	0.0012
5. Juchipila	59	46.547	7.181	1.488	0.1543	0.0320	0.0167	0.0035
6. La Villita	53	53.868	6.255	0.703	0.1161	0.0131	0.0113	0.0013
7. Los Campos	30	48.907	9.457	2.107	0.1934	0.0431	0.0107	0.0024
8. Mezquital del Oro	27	59.011	8.149	2.209	0.1381	0.0374	0.0069	0.0019
9. Moyahua de Estrada	31	50.884	6.928	1.146	0.1362	0.0225	0.0078	0.0013
10. Nochistlán	58	47.986	9.689	1.327	0.2019	0.0277	0.0215	0.0030
11. Teúl de González O.	44	51.566	8.691	1.338	0.1685	0.0259	0.0136	0.0021
12. Tlachichila	25	54.680	7.935	1.741	0.1451	0.0318	0.0067	0.0015
13. Tlaltenango	56	53.143	7.704	1.061	0.1450	0.0200	0.0149	0.0021
Sumas y promedios	544	52.267	-	-	0.1493	0.0246	0.1493	0.0241

Cuadro 9. Contrastes entre las predicciones históricas y las procedentes de los métodos regionales en dos registros de la región de Juchipila, Zacatecas, México.

Estación	TP*	Periodos de retorno en años				
		100	500	1 000	5 000	10 000
García de la Cadena	H	88.8	94.0	95.7	98.5	99.4
$\bar{X}_n = 57.700$ mm	R	106.3	125.2	133.2	151.5	159.3
	ER	19.7	33.2	39.2	53.8	60.3
Tecomate	H	78.0	87.3	90.8	98.1	100.8
$\bar{X}_n = 45.962$ mm	R	84.7	99.7	106.1	120.7	126.9
	ER	8.6	14.2	16.9	23.0	25.9
Tepechitlán $\bar{X}_n = 53$ mm	R	97.7	115.0	122.4	139.1	146.3

* tipo de predicción: H = histórica; R = regional; ER = error relativo.

en donde el error relativo se expresa en porcentaje y presenta un valor negativo cuando la lluvia estimada con predicciones adimensionales regionales resultó menor que la calculada probabilísticamente o histórica; en cambio, cuando conduzca a un valor positivo indica que la predicción estimada fue superior a la del registro. Para el registro discordante de la estación García de la Cadena, los ER variaron del 20 al 60% por exceso con respecto a las predicciones históricas, que por supuesto se consideran erróneas. En cambio, en Tecomate, los ER únicamente fluctuaron

del 9 al 26%, también por exceso, por lo cual las predicciones de los métodos regionales se consideran bastante aproximadas.

Análisis regional de frecuencia en la Región Hidrológica núm. 37

El otro ARF realizado incluyó las 20 estaciones pluviométricas del estado de Zacatecas que pertenecen a la Región Hidrológica núm. 37 (El Salado). Se siguió un procedimiento idéntico al descrito en el inciso anterior, por ello en el cuadro 6 se muestran los cocientes de momentos

L y sus respectivas discordancias (D_i); se observa que resultó discordante solamente el registro de la estación Trancoso. La aplicación de la versión corregida del Test de Langbein encontró que tal región es homogénea, pues ninguna de las 19 estaciones pluviométricas que la integran quedó fuera de sus curvas de control.

Ahora en el cuadro 10 se tienen las predicciones adimensionales obtenidas con el método regional de las estaciones-año, según los modelos probabilísticos LP3 y GVE de menor *EEA*, con un registro conjunto de 749 elementos escalados con la media aritmética. En el cuadro 11 se presentan los momentos L de los 19 registros de tal región y su respectivo escalamiento y ponderación.

El ajuste de la distribución GVE con el método de los momentos L ponderados condujo a las predicciones adimensionales que se tienen en el renglón final del cuadro 10. Tales predicciones resultaron las más elevadas y por seguridad de las estimaciones regionales son las adoptadas. Por lo anterior, en el cuadro 12 se presentan las predicciones estimadas regionalmente en las tres estaciones pluviométricas de la Región Hidrológica núm. 37, que fueron encontradas no homogéneas y también la discordante. En todas estas estaciones, la magnitud de la media de la *PMD* se estimó con base en los valores cercanos observados.

El valor del parámetro de forma (k) de la distribución GVE, calculado en los dos ARF realizados, en la zona geográfica de Juchipila y en la Región Hidrológica núm. 37, con los métodos de las estaciones-años y de momentos L ponderados, siempre resultó cercano a cero y positivo, entonces define una distribución Weibull, por lo cual no se aproxima al encontrado como valor máximo mundial por Koutsoyiannis (2004) de -0.150, es decir, distribución Fréchet, al procesar conjuntamente 169 registros de *PMD* de Europa y Estados Unidos, con un número de datos variando de 100 a 154, para un total de 18 065 estaciones-años.

Conclusiones

En este estudio de la precipitación máxima diaria anual (*PMD*) del estado de Zacatecas, México, quedó manifiesta la importancia de las pruebas estadísticas específicas que detectan componentes determinísticas en las series anuales de máximos, ya que de los 98 registros analizados con más de 25 datos (ver cuadro 1), 17 resultaron no homogéneos y por lo tanto no susceptibles de procesamiento probabilístico para obtener sus predicciones requeridas en el dimensionamiento hidrológico.

Este nuevo estudio probabilístico de la *PMD* del estado de Zacatecas, que utilizó registros o series anuales de máximos, que en promedio deben tener de 30 a 39 años más, en relación con el elaborado por la extinta Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), con datos hasta 1974, sólo mostró predicciones mayores en ciertas estaciones, como Río Grande, El Cazadero, Sain Alto, Nuevo Mercurio, Villa de Cos y Loreto. En otras estaciones, sus predicciones resultaron casi idénticas, como es el caso de El Arenal, Concepción del Oro, San Tiburcio, Cañitas de Felipe Pescador, Fresnillo, Boca del Tesorero y Presa Palomas. Pero en la mayoría (ver cuadro 4), las nuevas predicciones fueron sensiblemente menores, por ello se concluyó que los mapas de curvas isomáximas de la SRH, publicados en 1976, siguen vigentes para el estado de Zacatecas, México, y se presentan en las figuras 5, 6 y 7.

Los resultados del método estadístico de Hershfield para estimar la precipitación máxima probable en 24 horas puntual (*PMP*), concentrados en el cuadro 5, indican gran variabilidad en su magnitud desde valores cercanos a 300 milímetros en las regiones hidrológicas 36 y 37, hasta las magnitudes superiores a los 400 milímetros, comunes de la Región Hidrológica 12. Respecto a los cocientes, en cada estación pluviométrica, entre la *PMP* y la precipitación máxima diaria observada (P_o) del registro y la asociada con el periodo de retorno de 10 000 años ($P_{T=10000}$), se puede decir que resultaron bastante estables o similares, ya

Cuadro 10. Predicciones adimensionales obtenidas con los métodos regionales indicados en la Región Hidrológica núm. 37 (El Salado) del estado de Zacatecas, México.

Método regional, distribución de probabilidades y método de ajuste	Periodos de retorno en años				
	100	500	1 000	5 000	10 000
Estaciones-años. LP3. Mo. dominio logarítmico	2.050	2.430	2.591	2.961	3.120
Estaciones-años. GVE. Sextiles.	2.100	2.517	2.692	3.090	3.258
Mo. Ponderados. GVE. Momentos L .	2.108	2.542	2.726	3.148	3.327

Cuadro 11. Ponderación de los momentos L en los 19 registros de precipitación máxima diaria anual de la Región Hidrológica núm. 37 (El Salado) del estado de Zacatecas, México.

Estación	n	l_1	l_2	l_3	le_2	le_3	le_2	le_3
1. Agua Nueva	43	36.316	6.671	0.897	0.1837	0.0247	0.0105	0.0014
2. Calera de Víctor R.	51	40.998	6.718	1.060	0.1639	0.0259	0.0112	0.0018
3. Camacho	31	28.848	4.665	0.941	0.1617	0.0326	0.0067	0.0013
4. Cañitas de Felipe P.	37	37.476	8.512	1.828	0.2271	0.0488	0.0112	0.0024
5. Coapas	41	41.634	6.607	0.859	0.1587	0.0206	0.0087	0.0011
6. Concepción del O.	47	37.300	8.779	1.398	0.2354	0.0375	0.0148	0.0024
7. El Salvador	25	46.812	9.318	2.014	0.1991	0.0430	0.0066	0.0014
8. Fresnillo	54	43.900	8.553	1.045	0.1948	0.0238	0.0140	0.0017
9. Gral. Guadalupe V.	45	43.460	8.473	1.739	0.1950	0.0400	0.0117	0.0024
10. Guadalupe	31	43.129	8.782	0.588	0.2036	0.0136	0.0084	0.0006
11. Nuevo Mercurio	38	35.263	8.059	2.132	0.2285	0.0605	0.0116	0.0031
12. Pinos	55	48.876	8.942	1.395	0.1830	0.0285	0.0134	0.0021
13. San Antonio del C.	37	44.905	8.010	0.816	0.1784	0.0182	0.0088	0.0009
14. San Benito	28	46.175	11.389	2.143	0.2466	0.0464	0.0092	0.0017
15. San Jerónimo	30	40.007	7.031	0.838	0.1757	0.0209	0.0070	0.0008
16. San Tiburcio	37	40.135	8.603	1.597	0.2144	0.0398	0.0106	0.0020
17. Villa de Cos	45	49.276	9.935	1.533	0.2016	0.0311	0.0121	0.0019
18. Villa González O.	31	40.713	7.598	1.062	0.1866	0.0261	0.0077	0.0011
19. Villa Hidalgo	43	46.470	9.633	1.480	0.2073	0.0318	0.0119	0.0018
Sumas y promedios	749	39.563	-	-	0.1971	0.0323	0.1961	0.0319

Cuadro 12. Estimación de predicciones en las estaciones pluviométricas indicadas de la Región Hidrológica núm. 37 (El Salado) del estado de Zacatecas, México.

Estación	Periodos de retorno en años				
	100	500	1 000	5 000	10 000
Gruñidora ($\bar{X}_n = 38$ mm)	80.1	96.6	103.6	119.6	126.4
El Rusio ($\bar{X}_n = 43$ mm)	90.6	109.3	117.2	135.4	143.1
Zacatecas ($\bar{X}_n = 46$ mm)	97.0	116.9	125.4	144.8	153.0
Trancoso ($\bar{X}_n = 44$ mm)	92.8	111.8	119.9	138.5	146.4

que fluctúan poco y sus valores centrales son bastante parecidos (ver cuadro 5), pudiéndose recomendar 4.20 para el primer cociente y 2.20 para el segundo.

En relación con los análisis regionales de frecuencia, éstos permiten verificar o rechazar las predicciones obtenidas con registros cortos de PMD, así como obtener las de registros no susceptibles de procesamiento probabilístico por ser no homogéneos y, lo más relevante, de sitios o localidades donde no hay información pluviométrica. Trabajando por subregiones hidrológicas o zonas geográficas, lo más probable es que las pruebas de homogeneidad regional verifiquen la selección de estaciones pluviométricas realizada y que las predicciones regionales resulten bastante aproximadas, como lo mostraron los dos análisis realizados en el estado de Zacatecas: uno para la zona del río Juchipila, en la Región Hidrológica núm. 12 Parcial (río Santiago) y el otro para la Región Hidrológica núm. 37 (El Salado).

Por último, se recomienda llevar a cabo este tipo de estudios de la PMD en otras regiones hidrológicas o estados del país, ahora que existen registros amplios y que los métodos regionales han demostrado su utilidad, para realizar estimaciones o predicciones confiables en sitios sin información pluviométrica, las cuales son la base de los métodos hidrológicos de obtención de las crecientes de diseño, en localidades sin datos hidrométricos.

Agradecimientos

Se agradece al Ing. Humberto Abelardo Díaz Valdez, jefe de Proyecto de Hidrometeorología de la Dirección Local Zacatecas de la Conagua, haber proporcionado al autor el archivo en Excel correspondiente a las 134 estaciones pluviométricas con registro de precipitación máxima diaria anual (PMD), así como la verificación o corrección de todos los valores detectados como anómalos, por ser superiores a 100 milímetros en los 98 registros procesados de PMD.

El M. en I. Juan Antonio Araiza Rodríguez, profesor investigador de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, realizó la integración inicial de los registros por procesar, revisando en cada

año incompleto los datos de los meses disponibles para contrastarlos contra su media mensual; en caso de ser mayores eran seleccionados como valores potenciales o probables de ser seleccionados para el año incompleto. En una inspección del registro integrado se definió qué valores potenciales de años incompletos serían utilizados, comúnmente por ser superiores a los mínimos de los años completos.

Referencias

- Bobée, B. (1975). The Log-Pearson Type 3 Distribution and its Application to Hydrology. *Water Resources Research*, 11(5), 681-689.
- Buishand, T. A. (1982). Some Methods for Testing the Homogeneity of Rainfall Records. *Journal of Hydrology*, 58, 11-27.
- Campos-Aranda, D. F. (1998). Estimación estadística de la precipitación máxima probable en San Luis Potosí. *Ingeniería Hidráulica en México*, 13(3), 45-66.
- Campos-Aranda, D. F. (2008). Ajuste regional de la distribución GVE en 34 estaciones pluviométricas de la zona Huasteca de San Luis Potosí. *Agrociencia*, 42(1), 57-70.
- Campos-Aranda, D. F. (2010). Verificación de la homogeneidad regional mediante tres pruebas estadísticas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1(4), 157-165.
- Campos-Aranda, D. F. (2012). Descripción y aplicación de la versión corregida del Test de Langbein para verificar homogeneidad regional. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, 13(4), 411-416.
- Clarke, R. T. (1973). *Mathematical Models in Hydrology*. Chapter 5: The Estimation of Floods with Given Return Period (pp. 130-146). Irrigation and Drainage Paper 19. Rome: FAO.
- Fill, H. D., & Stedinger, J. R. (1995). Homogeneity Test Based Upon Gumbel Distribution and a Critical Appraisal of Dalrymple's Test. *Journal of Hydrology*, 166, pp. 81-105.
- Garros-Berthet, H. (1994). Station-Year Approach: Tool for Estimation of Design Floods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(2), 135-160.
- Gupta, R. S. (2008). *Hydrology and Hydraulic Systems*. Chapter 8: Computation of Extreme Flows (pp. 427-482). Illinois: Waveland Press, Inc.
- Hershfield, D. M. (1961). Estimating the Probable Maximum Precipitation. *Journal of Hydraulics Division*, 87(HY5), pp. 99-106.
- Hershfield, D. M. (1965). Method for Estimating Probable Maximum Rainfall. *Journal of American Water Works Association*, 57, 965-972.
- Hosking, J. R., & Wallis, J. R. (1997). *Regional Frequency Analysis. An Approach Based on L-Moments*. Chapter 3: Screening the Data (pp. 44-53) and Appendix: L-moments

- for some specific distributions (pp. 191-209). Cambridge: Cambridge University Press.
- Kite, G. W. (1977). *Frequency and Risk Analyses in Hydrology*. Chapter 12: Comparison of Frequency Distributions (pp. 156-168). Fort Collins, USA: Water Resources Publications.
- Kottogoda, N. T. (1980). *Stochastic Water Resources Technology*. Chapter 2: Analysis of Hydrologic Time Series (pp. 20-66). London: The MacMillan Press, Ltd.
- Koutsoyiannis, D. (2004). Statistics of Extremes and Estimation of Extremes Rainfall: II. Empirical Investigation of Long Rainfall Records. *Hydrological Sciences Journal*, 49(4), 591-610.
- Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. (1988). *Hydrology for Engineers*. Chapter 3: Precipitation (pp. 46-93) and Chapter 14: Stochastic Hydrology (pp. 374-397). London: McGraw-Hill Book Co., SI Metric Edition.
- Mansell, M. G. (2003). *Rural and Urban Hydrology*. Chapter 8: Analysis and Prediction of Flows (pp. 319-354). London: Thomas Telford Publishing.
- Ostle, B., & Mensing, R. W. (1975). *Statistics in Research*. Chapter 7: Regression Analysis (pp. 165-236). Third edition. Ames, USA: Iowa State University Press.
- Ruiz-Maya, L. (1977). *Métodos estadísticos de investigación*. Capítulo 9: Condiciones paramétricas del análisis de varianza (pp. 233-249). Madrid: Instituto Nacional de Estadística.
- Schulz, E. F. (1976). *Problems in Applied Hydrology*. Section Ten: Applications to Engineering Problems (pp. 459-491). Fort Collins, USA: Water Resources Publications.
- SRH (1976). *Boletín de Tormentas Máximas Observadas y Probables en México en 24 horas (hasta 1974)*. México, DF: Secretaría de Recursos Hidráulicos, Subsecretaría de Planeación. Dirección general de Estudios. Subdirección de Hidrología.
- Shaw, E. M., Beven, K. J., Chappell, N. A., & Lamb, R. (2011). *Hydrology in Practice*. Chapter 9: Precipitation Analysis (pp. 155-194) and Chapter 13: Estimating Floods and Low Flows in the UK (pp. 322-350). Fourth edition. London: Spon Press.
- Smith, J. A. (1993). Precipitation. Chapter 3. In D. R. Maidment (Ed.). *Handbook of Hydrology* (pp. 3.1-3.47). New York: McGraw-Hill, Inc.
- Stedinger, J. R., Vogel, R. M., & Foufoula-Georgiou, E. (1993). Frequency Analysis of Extreme Events. Chapter 18. In D. R. Maidment (Ed.). *Handbook of Hydrology* (pp. 18.1-18.66). New York: McGraw-Hill, Inc.
- WRC (1977). *Guidelines for Determining Flood Flow Frequency*. Bulletin # 17 A of the Hydrology Committee. Revised Edition. Washington, DC: Water Resources Council.
- Weiss, L. L. (1964). Ratio of True to Fixed-Interval Maximum Rainfall. *Journal of Hydraulics Division*, 90(HY1), 77-82.
- WMO (1971). *Climatic Change*. Annexed III: Standard Tests of Significance to be Recommended in Routine Analysis of Climatic Fluctuations (pp. 58-71). Technical Note No. 79, WMO-No. 195. Geneva: World Meteorological Organization, Secretariat of the WMO.
- WMO (1973). *Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation*. Chapter 4: Statistical Estimates (pp. 95-107). Operational Hydrology Report No. 1. WMO-332. Geneva: World Meteorological Organization.

Dirección del autor

Dr. Daniel Francisco Campos-Aranda

Profesor jubilado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México

Genaro Codina 240

Colonia Jardines del Estadio

78280 San Luis Potosí, San Luis Potosí, MÉXICO

Teléfono: +52 (444) 8151 431

campos_aranda@hotmail.com



Haga clic aquí para escribir al autor



Lago Cráter, La Preciosa, Puebla, México.

Foto proporcionada por Óscar Raúl Mancilla Villa.

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.



Huayacán, Jiutepec, Morelos, México.

Foto: Raúl Flores Berrones.

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. • <i>Abstract</i> y <i>keywords</i>. • 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.xxxxxx](http://www.xxxxxx)

Esto es: Apellido, A. A., & Apellido, B. B. (Año). Título del artículo. Título de la publicación, 1(2), 5-17. Recuperado de [http:// www.xxxxxx](http://www.xxxxxx)

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...: $\pi = 3.1416$.”.**

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 <i>et al.</i> (Año)	(Apellido, Apellido, & Apellido, año)	(Apellido del primer autor <i>et al.</i> , año)
Un trabajo por cuatro autores	Apellido, Apellido, Apellido y Apellido (Año)	Apellido <i>et al.</i> (Año)	(Apellido, Apellido, Apellido, & Apellido, año)	(Apellido del primer autor <i>et al.</i> , año)
Un trabajo por cinco autores	Apellido, Apellido, Apellido, Apellido y Apellido (Año)	Apellido <i>et al.</i> (Año)	(Apellido, Apellido, Apellido, Apellido, & Apellido, año)	(Apellido del primer autor <i>et al.</i> , 2008)
Una obra por seis o más autores	Apellido del primer autor <i>et al.</i> (Año)	Apellido del primer autor <i>et al.</i> (Año)	(Apellido del primer autor <i>et al.</i> , Año)	(Apellido del primer autor <i>et al.</i> , 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, integrado con artículos y notas técnicas inéditas, relacionadas con el agua, derivadas 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 de 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 técnico: 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 de agua.

Nota técnica: texto que trata avances en el campo de la ingeniería hidráulica y de la práctica profesional en materia de agua, sin que necesariamente se trate de una aportación original, aunque siempre deberá tratarse de un trabajo inédito.

Algunos trabajos sometidos al proceso de arbitraje 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. Ambos 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 sea 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.

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 para publicación.

Cuando los dictámenes se contrapongan o resulten poco consistentes, se podrá optar por solicitar la intervención de otros revisores o de los miembros del Consejo Editorial.

En ocasiones se podrá decidir sobre la aprobación o no de un artículo con el dictamen de dos revisores, más la opinión del editor por tema correspondiente, o la del editor en jefe.

Un artículo rechazado no se admitirá para un nuevo proceso de revisión.

El proceso de arbitraje se desarrollará de tal manera que tanto los autores como los revisores no conozcan el nombre de su contraparte.

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 para posible publicación.

Esta participación se considera una contribución profesional, que se realiza de manera honorífica.

Los árbitros cuentan con la "Guía para el revisor", que les proporciona la Coordinación Editorial de la revista.

Dictamen final

El dictamen derivado del proceso de arbitraje es inapelable.

Autores

Se publican trabajos de autores de cualquier nacionalidad que presenten sus contribuciones en español; sin embargo, también aceptamos trabajos que remitan en español o inglés.

Responsabilidad de los autores

La propuesta de un trabajo compromete a su autor a no someterlo simultáneamente a la consideración de otras publicaciones. En caso de que el artículo haya sido entregado a otro medio para su eventual publicación, se compromete 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.

Los colaboradores, cuyos artículos hayan sido aceptados, cederán formalmente los derechos de autor a **Tecnología y Ciencias del Agua**.

La responsabilidad del contenido de los artículos corresponde a los autores.

El autor es responsable de la calidad del español que utilice. Si su redacción es deficiente, se rechazará su contribución. **Tecnología y Ciencias del Agua** sólo se hará cargo del cuidado editorial.

El autor se compromete a realizar los ajustes que sean señalados por el editor temático en el tiempo fijado por éste; en caso de incumplimiento, el artículo será retirado del proceso de dictaminación y será calificado como rechazado.

El autor deberá estar atento para resolver las dudas y propuestas que presenten el editor y el coordinador editorial.

Cada autor deberá aprobar las pruebas finales de imprenta de sus textos.

Se sugiere revisar la "Guía para colaboradores".

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. Aparecerá en el segundo mes del bimestre.

Suscripción y distribución

La revista se distribuye por medio de suscripciones pagadas y honorarias.

Acceso abierto

Tecnología y Ciencias del Agua, antes *Ingeniería hidráulica en México*, permite consultar en su versión digital todo el material publicado desde 1985.

Ediciones especiales y números extraordinarios

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.

De la misma manera, 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.

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.



Artículos técnicos

Efectos del aumento del nivel del mar por cambio climático en la morfología de la ría de Celestún, Yucatán

Rogelio Torres-Mota

Paulo Salles-Afonso-de-Almeida

José López-González

Transferencia de sedimentos de una microcuenca a la red de drenaje urbano

Guillermo José Méndez

Carlos Alberto Depettris

Jorge Víctor Pilar

Oscar Orfeo

Alejandro Ricardo Ruberto

Estimación del potencial de tormentas vía la combinación de imágenes satelitales e información meteorológica: caso de estudio al noroeste de México

Fabiola Arellano-Lara

Carlos Escalante-Sandoval

Criterios hidrodinámicos para el diseño de sistemas de recirculación en acuicultura

Juan A. García-Aragón

Humberto Salinas-Tapia

Víctor Díaz-Palomarez

Boris M. López-Rebollar

Javier Moreno-Guevara

Leonarda M. Flores-Gutiérrez

Calidad del agua para riego en la Sierra Norte de Puebla, México

Álvaro Can-Chulim

Héctor Manuel Ortega-Escobar

Edgar Iván Sánchez-Bernal

Elia Cruz-Crespo

Contenido de boro en el agua superficial de Puebla, Tlaxcala y Veracruz

Oscar Raúl Mancilla-Villa

Ana Laura Bautista-Olivos

Héctor Manuel Ortega-Escobar

Carlos Ramírez-Ayala

Amada Laura Reyes-Ortigoza

Héctor Flores-Magdaleno

Diego Raymundo González-Eguarte

Rubén Darío Guevara-Gutiérrez

Suelos de humedal del lago de Patzcuaro, Michoacán, México

Lenin E. Medina-Orozco

Norma E. García-Calderón

Felipe García-Oliva

Elena Ikkonen

Percepciones y realidades de la contaminación en la comunidad minera San José de Avino, Durango

María de Lourdes Corral-Bermúdez

†Noelia Rivera-Quintero

Eduardo Sánchez-Ortiz

Diseño óptimo de la red de monitoreo del acuífero "Saltillo-Ramos Arizpe" para el adecuado manejo del recurso hídrico, aplicando un enfoque geoestadístico

Martín A. Díaz-Viera

Félix Canul-Pech

Esquema de cobro del servicio hidrológico que provee la cuenca alta del Pixquiac

Marta Magdalena Chávez-Cortés

Karla Erika Mancilla-Hernández

Modelamiento matemático de caudales recesivos en la región mediterránea andina del Maule; el caso del estero Upeo, Chile

Francisco Balocchi

Roberto Pizarro

Carolina Morales

Claudio Olivares

Notas técnicas

Evaluación de criterios de selección de modelos probabilísticos: validación con series de valores máximos simulados

Roberto S. Flowers-Cano

Robert Jeffrey Flowers

Fabián Rivera-Trejo

Predicciones extremas de lluvia en 24 horas en el estado de Zacatecas, México

Daniel Francisco Campos-Aranda

Discusión

Guía para colaboradores



Technical articles

Effects of Increased Sea Levels from Climate Change on the Celestún

Estuary Morphology

Rogelio Torres-Mota

Paulo Salles-Afonso-de-Almeida

José López-González

Sediment Transfer from a Microbasin to an Urban Drainage Network

Guillermo José Méndez

Carlos Alberto Depettris

Jorge Víctor Pilar

Oscar Orfeo

Alejandro Ricardo Ruberto

Estimation of Storm Potential by Combining Satellite Images and Meteorological Data: A Case Study in Northwestern Mexico

Fabiola Arellano-Lara

Carlos Escalante-Sandoval

Hydrodynamic Criteria to Design Water Recirculation Systems for Aquaculture

Juan A. García-Aragón

Humberto Salinas-Tapia

Víctor Díaz-Palomarez

Boris M. López-Rebollar

Javier Moreno-Guevara

Leonarda M. Flores-Gutiérrez

Irrigation Water Quality in the Sierra Norte in Puebla, México

Álvaro Can-Chulim

Héctor Manuel Ortega-Escobar

Edgar Iván Sánchez-Bernal

Elia Cruz-Crespo

Content of Boron in Surface Water in Puebla, Tlaxcala, and Veracruz

Oscar Raúl Mancilla-Villa

Ana Laura Bautista-Olivos

Héctor Manuel Ortega-Escobar

Carlos Ramírez-Ayala

Amada Laura Reyes-Ortigoza

Héctor Flores-Magdaleno

Diego Raymundo González-Eguarte

Rubén Darío Guevara-Gutiérrez

Wetland Soils from Lake Patzcuaro, Michoacan, Mexico

Lenin E. Medina-Orozco

Norma E. García-Calderón

Felipe García-Oliva

Elena Ikkonen

Perceptions and Realities about Pollution in the Mining Community of San José de Avino, Durango

María de Lourdes Corral-Bermúdez

†Noelia Rivera-Quintero

Eduardo Sánchez-Ortiz

A Geostatistical Approach to the Optimal Design of the "Saltillo-Ramos Arizpe" Aquifer Monitoring Network for Proper Water Resources Management

José Cristóbal Medina-González

Gabriel Díaz-Hernández

Charging Scheme for Hydrological Services Provided by the Upper Pixquiac River Watershed

Marta Magdalena Chávez-Cortés

Karla Erika Mancilla-Hernández

Mathematical Modeling of Recessive Flows in the Andean Mediterranean Region of Maule; Case Study of Estero Upeo, Chile

Francisco Balocchi

Roberto Pizarro

Carolina Morales

Claudio Olivares

Technical notes

Evaluation of Probabilistic Model Selection Criteria: Validation with Series of Simulated Maxima

Roberto S. Flowers-Cano

Robert Jeffrey Flowers

Fabián Rivera-Trejo

Extreme 24-Hour Rainfall Predictions in the State of Zacatecas, Mexico

Daniel Francisco Campos-Aranda

Discussion

Contributor's guide

