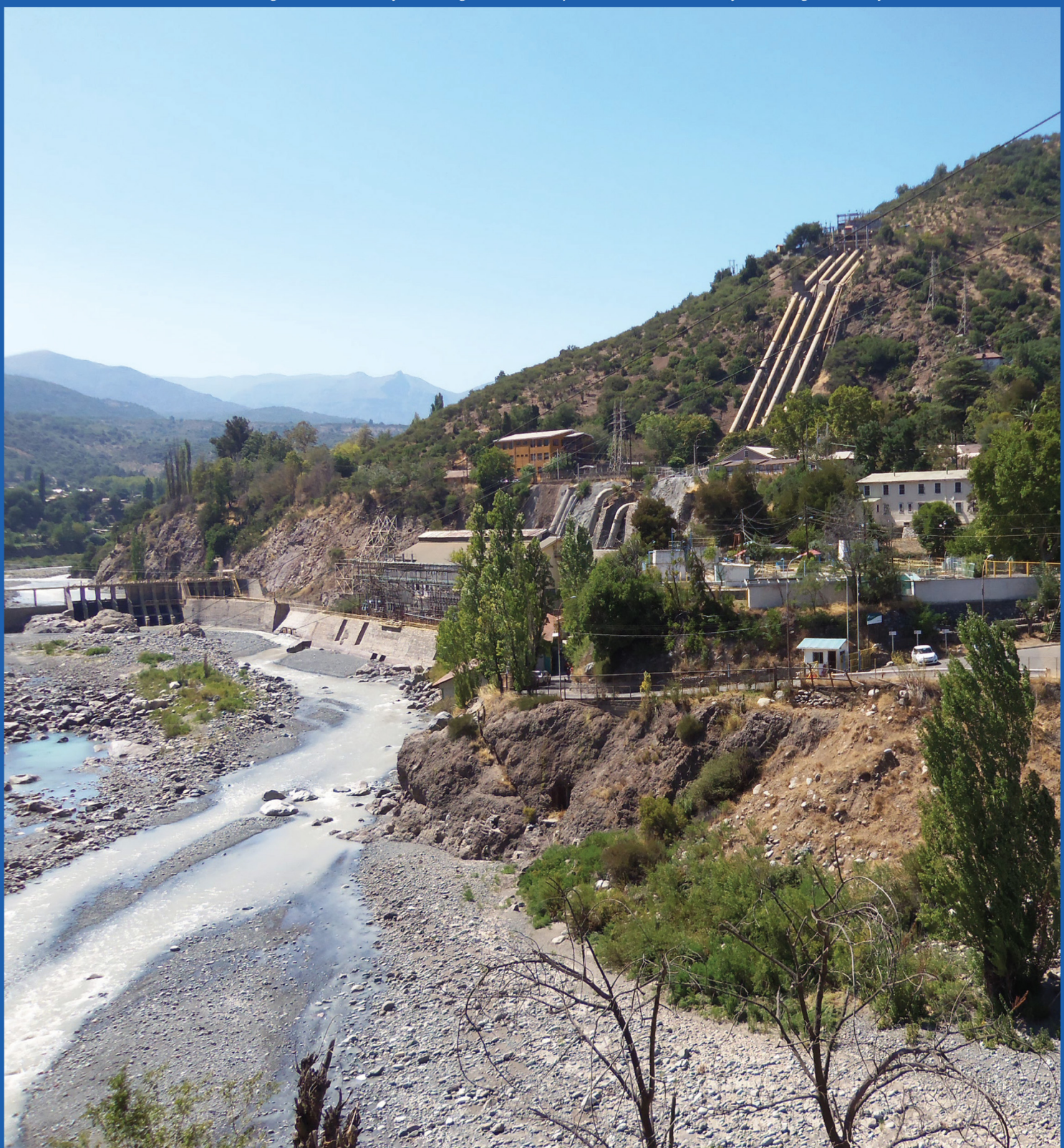
ISSN 2007-2422

Tecnología y Ciencias del Agua

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

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



Vol. VII, núm. 2, marzo-abril de 2016

Tecnología y Ciencias del Agua

Comité Editorial

Consejo Editorial

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

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

Editor en Agua y Energía
Dr. Humberto Marengo Mogollón
Consultor

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

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

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

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

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

Editor en Hidrología
Dr. Fco. Javier Aparicio Mijares
Consultor

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

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

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

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

©***TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA***, vol. VII, núm. 2, marzo-abril de 2016, es una publicación bimestral editada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550, teléfono +52 (777) 3 29 36 00, extensión 474, www.imta.gob.mx/tyca, fsalinas@tlaloc.imta.mx. Editor responsable, Nahún Hamed García Villanueva; Reserva de Derecho al Uso Exclusivo No. 04-2011-083111404500-203 e ISSN 2007-2422, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derechos de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Subcoordinación de Difusión y Divulgación, Lic. Francisco José Salinas Estrada, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. Fecha de la última modificación, 15 de marzo de 2016.

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

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

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

ISSN 2007-2422

Para comentarios a la Coordinación Editorial, dé clic aquí

Tecnología y Ciencias del Agua

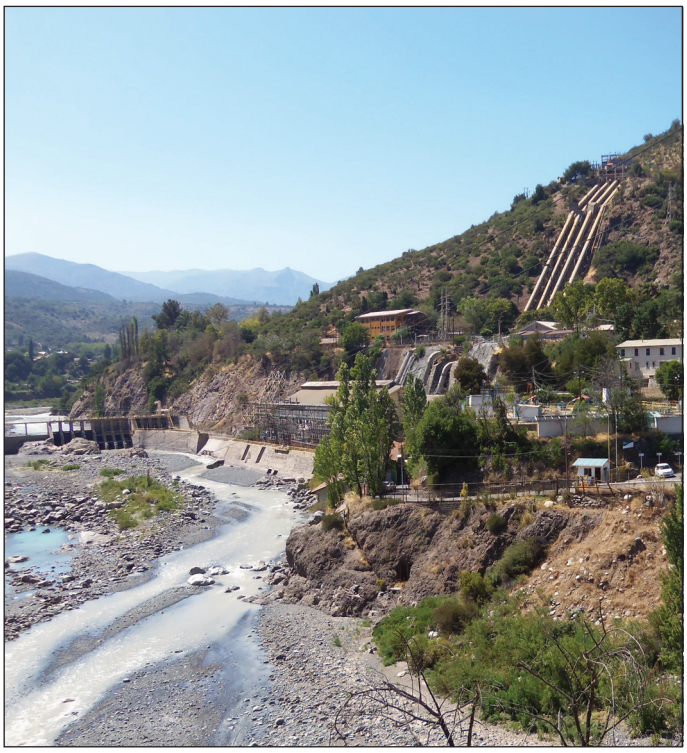
Vol. VII, núm. 2, marzo-abril de 2016

Para suscripciones, dé clic aquí

Portada: sección alta del río Cachapoal, precordillera de los Andes, comuna de Machalí, Chile, donde se ubica la central hidroeléctrica de pasada Coya, a 30 km de Rancagua, cuyas operaciones datan de 1911 y abastece de energía eléctrica a la minera Codelco, productora de cobre.

La evaluación de la disponibilidad del agua en una cuenca es un desafío complejo, pues tiene que ver con las características geográficas del lugar, uso y comportamiento del ciclo hidrológico, afectado por procesos de variabilidad y cambio climático. La agricultura depende de las condiciones climáticas, pues las fluctuaciones o variabilidades ejercen un significativo efecto en el rendimiento de los cultivos. Por lo tanto, la evaluación del uso del recurso agua durante el proceso de producción agrícola, considerando la variabilidad climática, contribuiría a incentivar una mejor gestión en las prácticas de manejo del agua en un área. En este contexto, la huella hídrica se ha propuesto como una herramienta que identifica el uso del agua y los efectos de la producción agrícola, proporcionando información para la toma de decisiones. Ver el artículo "Variabilidad de la huella hídrica del cultivo de cereales, río Cachapoal, Chile" de Vanessa Novoa *et al*. (pp. 35-49).

Foto: Vanessa Novoa.



Cultivo hidropónico de apio en el Campo de Cartagena, Murcia, España.

Foto: José Luis García Aróstegui.

Contenido

Artículos técnicos

La sustentabilidad de la agricultura de riego ante la sobreexplotación de acuíferos
Oscar Luis Palacios-Vélez
Bernardo Samuel Escobar-Villagrán

Sistemas de agua potable rurales. Instituciones, organizaciones, gobierno, administración y legitimidad
Emmanuel Galindo
Jacinta Palerm

Variabilidad de la huella hídrica del cultivo de cereales, río Cachapoal, Chile
Vanessa Novoa
Octavio Rojas
José Luis Arumí
Claudia Ulloa
Roberto Urrutia
Anny Rudolph

Agua virtual en un marco insumo-producto para la cuenca del valle de México
Lilia Rodríguez-Tapia
Jorge A. Morales-Novelo
Fabiola S. Sosa-Rodríguez
Juan Carlos Altamirano-Cabrera
Francisco Torres-Ayala

Evaluación de la sostenibilidad de cuencas mediterráneas semiáridas. Caso de estudio: cuenca del Segura, España
Javier Senent-Aparicio
Julio Pérez-Sánchez
Alicia María Bielsa-Artero

Metodología para la delimitación y caracterización de humedales en escalas 1:50 000 y 1:20 000
Jorge Brena
Cervando Castillo
Ana Wagner

Modelación del riesgo de inundaciones en el estado de Tabasco en el periodo 1961-2007
Ana Laura Reyes-Olvera
Eduardo Gutiérrez-González

Relaciones entre parámetros de los modelos de infiltración de Kostiakov y Lewis-Kostiakov, Córdoba, Argentina
Juan Francisco Weber
Laureana Apestegui

Contents

Technical articles

Sustainable Crop Irrigation and Overexploitation of Aquifers 5
Oscar Luis Palacios-Vélez
Bernardo Samuel Escobar-Villagrán

Rural Drinking Water Systems. Institutions, Organizations, Government, Administration and Legitimacy 17
Emmanuel Galindo
Jacinta Palerm

Variability in the Water Footprint of Cereal Crops, Cachapoal River, Chile 35
Vanessa Novoa
Octavio Rojas
José Luis Arumí
Claudia Ulloa
Roberto Urrutia
Anny Rudolph

Virtual Water in an Input-Output Framework for the Valley of Mexico Basin 51
Lilia Rodríguez-Tapia
Jorge A. Morales-Novelo
Fabiola S. Sosa-Rodríguez
Juan Carlos Altamirano-Cabrera
Francisco Torres-Ayala

Assessment of Sustainability in Semiarid Mediterranean Basins: Case Study of the Segura Basin, Spain 67
Javier Senent-Aparicio
Julio Pérez-Sánchez
Alicia María Bielsa-Artero

Methodology to Delimit and Characterize Wetlands at Scales of 1:50 000 and 1:20 000 85
Jorge Brena
Cervando Castillo
Ana Wagner

Flood Risk Modeling for the State of Tabasco, 1961-2007 99
Ana Laura Reyes-Olvera
Eduardo Gutiérrez-González

Relation between the Parameters of the Kostiakov and Lewis-Kostiakov Infiltration Models, Cordoba, Argentina 115
Juan Francisco Weber
Laureana Apestegui

El abasto de agua por pipa en el valle de Texcoco, México
Monserrat Iliana Gómez-Valdez
Jacinta Palerm-Viqueira

Water Supplied by Truck in the Valley of Texcoco, Mexico 133
Monserrat Iliana Gómez-Valdez
Jacinta Palerm-Viqueira

Gestión del riego enfocada a variabilidad climática en el cultivo de papa: aplicación al Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa, México
Ernesto Sifuentes
Jaime Macías
Waldo Ojeda
Víctor M. González
Daniel A. Salinas
José G. Quintana

Irrigation Management for Potato Crops Based on Climate Variability: Application in Irrigation District 075, Fuerte River, Sinaloa, Mexico 149
Ernesto Sifuentes
Jaime Macías
Waldo Ojeda
Víctor M. González
Daniel A. Salinas
José G. Quintana

Discusión
Guía para colaboradores

Discussion 169
Contributor's guide 171

La sustentabilidad de la agricultura de riego ante la sobreexplotación de acuíferos

• Oscar Luis Palacios-Vélez* • Bernardo Samuel Escobar-Villagrán •
Colegio de Postgraduados, México
*Autor de correspondencia

Resumen

Palacios-Vélez, O. L., & Escobar-Villagrán, B. S. (marzo-abril, 2016). La sustentabilidad de la agricultura de riego ante la sobreexplotación de acuíferos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *7*(2), 5-16.

Se discuten los supuestos básicos del "desarrollo sustentable" y se comentan algunos de los enormes retos que deberán afrontarse para alcanzar ese desarrollo. Sobre este punto se comenta un estudio realizado por el Stockholm Environment Institute y el Tellus Institute de Boston (Great Transition. The Promise and Lure of the Times Ahead) en relación con tres escenarios posibles: a) escenario convencional, b) escenario catastrofista y c) escenario gran transición. Después se expone la necesidad e importancia de la agricultura de riego en la mayor parte del país, y se presenta un resumen de la infraestructura hidráulica construida hasta 2013. Se comentan también los principales retos a la que se enfrenta la agricultura de riego, como son: a) falta de una conciencia social sobre el valor real del agua tanto por parte de la autoridad como de los usuarios agrícolas y urbanos; b) alteraciones a la cantidad y calidad del escurrimiento de los ríos; c) sobreexplotación de acuíferos; d) ensalitramiento de los suelos; e) contaminación de acuíferos y cuerpos superficiales de agua, y f) conflictos entre el uso agrícola del agua, y los usos industrial y municipal. El empleo cada vez más intenso de las aguas subterráneas ha generado la sobreexplotación de muchos acuíferos, aunque es difícil evaluar de forma correcta el grado de sobreexplotación. Se exponen dos métodos para llevar a cabo esta evaluación: a) balance hidrológico y b) evolución de niveles de agua subterránea, tomando como ejemplo el acuífero de Texcoco. Por último, se dan algunas recomendaciones para enfrentar el problema de la sobreexplotación de acuíferos.

Palabras clave: desarrollo sustentable, agricultura de riego, sobreexplotación de acuíferos.

Abstract

Palacios-Vélez, O. L., & Escobar-Villagrán, B. S. (March-April, 2016). Sustainable Crop Irrigation and Overexploitation of Aquifers. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 7(2), 5-16.*

This article discusses the basic premises of "sustainable development" and mentions some of the enormous challenges that need to be addressed to achieve such development. A study by the Stockholm Environment Institute and the Tellus Institute of Boston (Great Transition. The Promise and Lure of the Times Ahead) presents three possible scenarios related to this topic: a) conventional, b) catastrophic and c) a "great transition." The need and importance of crop irrigation in the majority of regions in the country is then discussed, and the hydraulic infrastructure built up to 2013 is summarized. The main challenges involved in crop irrigation are also mentioned, including: a) lack of social awareness about the real value of water on the part of authorities as well as agricultural and urban users; b) changes in the amount and quality of runoff from rivers; c) overexploitation of aquifers, d) salinization of soils, e) contamination of aquifers and surface water bodies and f) conflicts between agricultural water users and industrial and municipal water. The increasingly intensified use of groundwater has resulted in an overexploitation of many aquifers, although it is difficult to correctly evaluate the degree of overexploitation. Two methods to evaluate this are presented —hydrological balance and evolution of groundwater levels— based on the example of the Texcoco aquifer. Lastly, some recommendations are presented to address the problem of overexploitation of aquifers.

Keywords: *Sustainable development, crop irrigation, overexploitation of aquifers*

Publicado por invitación

Introducción

La agricultura en general y la agricultura de riego en particular son actividades que han cambiado de modo significativo el paisaje de nuestro planeta y alterado muchos de los delicados ecosistemas que existían antes del aceleramiento del desarrollo humano que ocurre en los últimos 200 a 250 años, periodo por completo insignificante, comparado con la edad estimada de la Tierra. Sin embargo, el desarrollo de las comunidades, comunicaciones, industria, y consiguiente generación de energía y agricultura, en particular la altamente tecnificada y de riego alcanzan un crecimiento de características exponenciales en los últimos 100 o 150 años, de los cuales los últimos decenios son los más preocupantes. Aparejado con este crecimiento exponencial, ha aparecido una serie de problemas que ponen en peligro tal crecimiento y requieren ser analizados con sumo cuidado. Uno de estos problemas se refiere a la sobreexplotación de acuíferos, que involucra tanto a usuarios agrícolas como industriales y urbanos.

La sobreexplotación de acuíferos es uno de los problemas que debe resolverse para alcanzar un "desarrollo sustentable", que se define como un desarrollo que permite satisfacer las necesidades de la presente generación, pero sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer de manera similar sus propias necesidades. El desarrollo sustentable debe ser *socialmente aceptable, económicamente viable y ambientalmente responsable*, aunque en sentido estricto no se sabe si estas tres condiciones pueden alcanzarse de forma simultánea. Este concepto se popularizó en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo y el Ambiente, comúnmente conocida como Cumbre de Río de Janeiro, que tuvo lugar en 1992. La División para el Desarrollo Sustentable del Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas (http://www.un.org/esa/sustdev/documents/docs_sdissues.htm) lista 42 áreas de actividad requeridas para lograr este tipo de desarrollo. De manera similar, la llamada Agenda 21, una serie de propuestas hechas ante la Conferencia sobre Medio Ambiente y Desarrollo en 1992 (http://www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda21/english/agenda21toc.htm), presenta acciones en 40 diferentes áreas o temas, que requieren atención para alcanzar tal tipo de desarrollo. Tal vez mencionar un elevado número de acciones a seguir complique las labores de seguimiento y evaluación. A nuestro parecer se deben destacar cuatro áreas de acción fundamentales: 1) erradicación de la pobreza; 2) conservación de los recursos naturales; 3) prevención y combate de la contaminación, y 4) combate del calentamiento global. A continuación se comentan de forma breve:

1. *Erradicación de la pobreza*. Parece haber un consenso en que para alcanzar un desarrollo sustentable se requerirá de la activa participación de *todos* los sectores de la sociedad, en particular de los más numerosos, que suelen ser los más pobres. Sin embargo, tal colaboración sólo se logrará si primero se reduce la enorme desigualdad social y económica que se da tanto entre países ricos y pobres como dentro de cada nación. El producto interno bruto *per cápita* en los países más ricos es de entre 30 000 y 100 000 dólares estadounidenses por habitante por año, cifra que para el caso de Luxemburgo rebasa los 100 000 dólares. En cambio, el ingreso correspondiente en las naciones más pobres no alcanza los 1 000 dólares por habitante y año; es decir, 30 o más veces menos (http://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.PCAP.CD). Además, dentro de cada país, las diferencias también son enormes y han venido aumentando año tras año. En México, al igual que en otros países de Latinoamérica, casi la mitad de la población vive en condiciones de pobreza o pobreza extrema. Obviamente, los que menos tienen sólo están pensando qué hacer para darle de comer a su familia. No es posible esperar que puedan preocuparse por el cuidado del ambiente, el calentamiento global o lo que

• ISSN 2007-2422

pueda pasar con las generaciones futuras. Pobreza y desigualdad social son entonces los principales obstáculos para el desarrollo sustentable.

2. *Conservación de los recursos naturales*. Esta acción es casi un sinónimo del desarrollo sustentable, pues su sobreexplotación y, más aún, su agotamiento, significaría una verdadera catástrofe para la humanidad. Es, pues, urgente hacer un uso cuidadoso, eficiente, muy bien planeado y supervisado de los recursos naturales, en particular del agua, suelo, recursos del subsuelo y biota. Por otro lado, el crecimiento demográfico que se ha tenido en los últimos 100 años, en particular en los países menos desarrollados, está ejerciendo una gran presión sobre los recursos naturales, por lo que es imperioso reducir este crecimiento.

3. *Prevención y combate de la contaminación*. Cada vez es más evidente que nos estamos ahogando en nuestros propios detritos, por lo que es apremiante prevenir y combatir la contaminación atmosférica, del agua y del suelo, algo que se dice con facilidad, pero que va a costar mucho esfuerzo de parte de toda la sociedad, pues involucra fuertes inversiones en la industria, agricultura, servicios municipales y transporte. El combate de la contaminación es una condición obligada para mejorar la salud humana y calidad de vida. No se puede concebir un verdadero desarrollo humano en un ambiente deteriorado y contaminado.

4. *Combate del calentamiento global*. Aunque se reconoce que la participación de los países en desarrollo en la emisión de gases con efecto de invernadero y en el calentamiento global es mucho menor que la de los países desarrollados, como Estados Unidos, China y Japón, así como en la Unión Europea, es indispensable incrementar nuestros esfuerzos para reducir el consumo de energéticos provenientes del petróleo y aumentar el uso de energías alternativas, como la eólica, solar, geotérmica y la obtenida de biomasa. Se debe tomar conciencia de que el petróleo se acabará más temprano que tarde, y, sobre todo, se irá haciendo cada vez más inaccesible. Por esta razón es urgente fomentar el uso de biocombustibles, aprovechando la experiencia de Brasil, país que ha logrado avances considerables en tal área. Esto contribuirá a disminuir la acumulación de gases con efecto de invernadero y a reducir el cambio climático global.

Para lograr una amplia participación de la sociedad es preciso crear conciencia ambiental. En este esfuerzo deben participar todos los que han tenido la oportunidad de compenetrarse en mayor o menor grado de estos problemas. Para ello hay que hacer uso de todos los medios disponibles que expliquen los peligros de la sobreexplotación de los recursos naturales, los riesgos de la contaminación y del calentamiento global para la supervivencia del hombre, y de las especies vegetales y animales. Es vital propiciar un cambio en los estilos de vida, a fin de ir sustituyendo los valores del consumismo e individualismo, por los valores del desarrollo cultural, artístico, intelectual y de solidaridad social hacia las clases menos favorecidas.

Aportaciones del Stockholm Environment Institute y el Tellus Institute de Boston

Es normal que al meditar sobre los problemas del desarrollo sustentable nos preguntemos si seremos capaces de superar todos estos obstáculos y alcanzar un equilibrio ecológico que nos permita vivir de forma decorosa, sin poner en peligro las generaciones futuras o si nos iremos degradando con posibilidades de desaparecer como sociedad organizada. Hay grupos de investigadores de universidades e instituciones científicas que están tratando de responder a esta interrogante. Se puede mencionar, por ejemplo, el estudio realizado por el Stockholm Environment Institute y el Tellus Institute de Boston, Massachusetts. Apoyado por estas instituciones, un grupo de investiga-

ISSN 2007-2422

dores, liderado por Paul Raskin (2002), elaboró un reporte intitulado "Great Transition: The Promise and Lure of the Times Ahead". En este estudio se consideran tres escenarios plausibles, denominados evolucionario, catastrófico y el que llaman "gran transición".

Según este estudio, los *evolucionistas* son optimistas. Piensan que los patrones dominantes observados hoy en día pueden traer prosperidad, estabilidad y salud ecológica sin mayores sorpresas ni discontinuidades agudas. Consideran que los ajustes incrementales en los mercados y políticas gubernamentales serán capaces de controlar los problemas sociales, económicos y ambientales.

Los *catastrofistas*, por su parte, temen que las tensiones sociales, económicas y ambientales no se van a resolver, con consecuencias terribles para el futuro del mundo, que se subdividirá en dos estratos antagónicos: unos pocos enclaves amurallados para las élites privilegiadas, y amplios sectores caóticos y anárquicos para las mayorías pauperizadas.

Por último, los seguidores de la *gran transición* comparten estos temores, pero creen que con la activa participación, principalmente de los jóvenes y las organizaciones no gubernamentales (ONG), haciendo amplio uso de las redes sociales y las nuevas tecnologías de la información, serán capaces de influir sobre la forma de actuar de los gobiernos y de las grandes corporaciones hasta lograr los cambios y transformaciones requeridas para renovar la sociedad, y alcanzar un desarrollo que sea sustentable. Sin embargo, esta situación sólo se logra después de una profunda crisis global, que suponen tendría lugar hacia el año 2015 (estudio hecho en 2002).

Estos escenarios representan tres mundos posibles: uno de ajustes incrementales; otro de cataclismos, y uno más de cambios estructurales y renovación.

La agricultura de riego

El análisis de los problemas de la sustentabilidad puede hacerse por sectores de la actividad humana. Uno de los principales es la agricultura, en particular la de riego, que conlleva los impactos más fuertes sobre el ambiente. En el caso particular de México, el riego es indispensable o necesario en la mayor parte del país, que cuenta con una precipitación pluvial media anual del orden de 772 mm. Sin embargo, y como suele suceder, el agua que se precipita no está distribuida espacialmente de manera homogénea en el territorio nacional; existen amplias regiones con precipitación media anual de menos de 200 mm en el noroeste del país y zonas con más de 3 000 mm en el sureste. También hay amplias fluctuaciones temporales con periodos de estiaje prácticamente sin lluvias y regiones con precipitaciones mensuales del orden de 500 mm. Estas condiciones naturales han propiciado el avance de la irrigación en la medida que el crecimiento poblacional y el desarrollo económico han elevado la demanda de productos agrícolas. Aunque en el país existen regiones donde la agricultura de temporal es exitosa, se estima que en general la agricultura de riego en cultivos como maíz grano, sorgo grano, trigo y frijol es de 2 a 3 veces más productiva que la de temporal. Un dato más revelador de la importancia de la agricultura de riego es que en 2014, el valor total de la producción agrícola se estimaba en $238 559 104.00 de los cuales 64% ($152 310 412.00) correspondía a la producción bajo riego y tan sólo 36% ($86 248 692.00) eran de agricultura de temporal. Debe agregarse que la superficie cosechada de riego ese año fue de 4 119 605 ha, mientras que la superficie cosechada de temporal fue de 10 980 356 ha (http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado). Esto explica el acelerado desarrollo que tuvo la irrigación en nuestro país desde la fundación de la Comisión Nacional de Irrigación en 1926 y la creación de la Secretaría de Recursos Hidráulicos en 1947. Las cifras marcan la importancia por cuidar el potencial productivo de las tierras de riego y mejorar la eficiencia en el uso del agua, lo cual permitiría incrementar la superficie de riego y la producción de cultivos, pues el aumento de la población y la urgencia de elevar su poder adquisitivo continuarán extendiendo la deman-

• ISSN 2007-2422

da de todo tipo de productos agrícolas. En el cuadro 1 se presenta un resumen de la principal infraestructura hidráulica construida para los diferentes usuarios nacionales hasta el año 2013.

Retos que enfrenta la agricultura de riego

Para lograr una agricultura de riego sustentable tendrá que afrontarse una serie de retos, entre los cuales se pueden destacar los siguientes:

a) *Falta de conciencia social sobre el valor real del agua*. El primer problema que enfrenta la política hidráulica en México es la falta de conciencia social sobre el valor real del agua tanto por parte de la autoridad como de los usuarios agrícolas y urbanos, lo que se manifiesta en un uso ineficiente, muchas veces descuidado, de este recurso.

b) *Sistemas de riego gravitacional, y alteraciones a la cantidad y calidad del escurrimiento de los ríos*. Los sistemas de riego gravitacional de las zonas áridas y semiáridas tienen como finalidad captar, almacenar, conducir y distribuir agua de lluvia, llevándola a los campos de cultivo para complementar los requerimientos hídricos de los cultivos, y así posibilitar o mejorar sus rendimientos. Los sistemas de riego, por lo general, comprenden una presa y su respectivo embalse en un área topográficamente adecuada sobre el cauce de un río, así como un sistema de canales y estructuras hidráulicas requeridas para su operación. Complementan al sistema de riego los sistemas de drenaje, que incluyen los drenes parcelarios, algunos de tubería plástica enterrada, así como drenes colectores de diversa jerarquía, que entregan las aguas residuales a un cuerpo receptor, que puede ser el océano, lago interno o el mismo río. Desde el punto de vista ambiental, una característica muy importante a considerar es que las aguas de drenaje siempre tienen un contenido de sales solubles superior al de las aguas originales del río debido a que los procesos evapotranspirativos de los cultivos utilizan agua, pero dejan las sales solubles en las aguas residuales que van hacia el manto freático, y los acuíferos o drenes. Estas aguas residuales también contienen residuos de diferentes agroquímicos que se emplean en la agricultura moderna. Todo esto significa que los ríos cuyas aguas son utilizadas en menor o mayor grado para el riego, después de estos aprovechamientos terminan con menos agua y de peor calidad si en el río se reciben las descargas de los drenes del sistema de riego. Esta situación puede empeorar de modo dramático si en el mismo río se tiene una cascada de sistemas

Cuadro 1. Infraestructura hidráulica construida en México hasta 2013.

Infraestructura hidráulica **5,163 presas y bordos de almacenamiento, con una capacidad total de almacenamiento de alrededor de 150 km^3, equivalentes a 10% de la precipitación anual**	
Infraestructura agrícola	**Infraestructura urbana**
6.4 millones de hectáreas de riego, de las cuales 3.4 millones de hectáreas corresponden a 85 distritos de riego y 3 millones de hectáreas a más de 39 000 a pequeñas "unidades de riego".	742 plantas potabilizadoras en operación.
Un volumen de agua de 62 km^3/año es usado en la irrigación y de este volumen, 21 km^3/año se extrae de acuíferos.	2 287 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación y 2 617 plantas de tratamiento de aguas residuales industriales en operación; 3 000 km de acueductos.

Fuente: Semarnat-Conagua, 2014.

ISSN 2007-2422

de riego, algo que empieza a observarse con mayor frecuencia en la medida que se ha desarrollado la agricultura de riego en los últimos 100 años.

Los sistemas de riego son tan antiguos como la humanidad misma. Algunos realmente viejos siguen en operación, como el sistema del río Nilo en Egipto; pero muchos otros han desaparecido, como en Mesopotamia y la antigua Persia. Otros más están con grandes problemas o en vías de extinción después de haber provocado catástrofes ecológicas sin precedentes. Es de especial interés para las audiencias de especialistas en riego conocer estas experiencias, a fin de crear conciencia de los peligros del riego y uso desmedido de agroquímicos, y para tratar de prevenir tragedias similares.

El caso más dramático de catástrofe ecológica de un proyecto de riego es el acaecido en el sistema de riego de los ríos Amu Darya y Syr Darya, que desembocan en un gran lago llamado mar de Aral, por sus grandes dimensiones originales. Estos ríos irrigan tierras en las exrepúblicas soviéticas de Tadzhikistán, Kyrguistán, Uzbequistán, Turkmenistán y Kazajstán. Las obras de riego empezaron a construirse en la década de 1930, pero tuvieron un repunte importante en el decenio de 1960, cuando las autoridades soviéticas decidieron incrementar sustancialmente la producción algodonera, para surtir la creciente demanda interna y exportar. Como se sabe, este cultivo requiere de grandes láminas de riego y además demanda del uso de muchos agroquímicos, como fertilizantes, insecticidas, pesticidas y herbicidas. Este incremento en la irrigación trajo consigo una fuerte disminución de los escurrimientos que llegaban al mar de Aral, como consecuencia se redujo el área y volumen del lago. Hay que agregar que los bajos volúmenes de escurrimiento tenían un mayor contenido de sales solubles y residuos de peligrosos agroquímicos, por lo que el mar no sólo se redujo, sino que la calidad de su agua empeoró, para perjuicio de la pesca y salud de la población. Los daños fueron realmente incalculables, no sólo en términos económicos sino sociales y políticos. Mucho se ha escrito últimamente sobre este problema y se han mencionado varios cursos de acción para mitigar los daños, pero una característica común es que todos requieren de grandes inversiones y mucho tiempo. Baste señalar que en enero de 1994, las repúblicas de Kazajstán, Uzbequistán, Turkmenistán, Tadzhikistán y Kyrguistán firmaron un pacto para dedicar 1% de sus presupuestos en ayudar a restaurar los daños hechos. Para 2006, los proyectos de restauración del Banco Mundial, en especial en la parte norte del lago, estaban dando lugar a ciertas mejoras, logrando un inesperado alivio para lo que había sido un cuadro pesimista en extremo (http://www.answers.com/aral+sea?cat=travel&gwp=11&method=3&ver=2.3.0.609). En México, esto debe servir como advertencia de lo que puede suceder con los lagos de Chapala, Cuitzeo y Pátzcuaro, que han visto disminuir la cantidad y calidad de los escurrimientos que les llegaban, y que ahora están contaminados con agua residual tanto urbana como agrícola e industrial.

c) *Sistemas de riego por bombeo y sobreexplotación de acuíferos*. Como se señaló, de toda el agua empleada en la agricultura de riego de nuestro país (unos 62 km^3), una tercera parte (21 km^3) proviene del subsuelo. La Comisión Nacional del Agua (Conagua) ha identificado y delimitado 653 acuíferos, habiendo evaluado y publicado en el *Diario Oficial de la Federación* (DOF) la disponibilidad de agua en 2013 y resultando que 106 de ellos están sobreexplotados; es decir, se extrae más agua que la recarga media estimada, por lo que los niveles piezométricos se vienen abatiendo año con año. Esto es, el régimen de extracciones no puede perdurar de manera indefinida, lo cual hace necesaria una profundización o reubicación de los pozos de bombeo. La situación es verdaderamente crítica en el Valle de México,

• ISSN 2007-2422

en estados como Querétaro, Guanajuato y Aguascalientes —donde el agua se utiliza de modo preferente para fines municipales e industriales—, al igual que en Sonora y Baja California Sur. El problema que se tiene para el desarrollo sustentable es que "algunos expertos opinan que para mantener la seguridad alimentaria se necesitará un incremento del 15 al 20 por ciento en la extracción de agua hasta el año 2025 [mientras que, por otro lado] algunos ambientalistas opinan que para preservar los ya estresados recursos hídricos, las extracciones deberían reducirse por lo menos en un diez por ciento durante el mismo periodo" (Castro *et al*., 2006). Dado que muchos de los acuíferos sobreexplotados son una fuente importante, o la única fuente, de abastecimiento de agua a poblaciones, la solución no puede consistir solamente en eliminar los subsidios al costo del agua, así como de la energía utilizada para el bombeo y dejar que las fuerzas del mercado vayan descartando a los usuarios que obtienen menos beneficios por metro cúbico de agua utilizada. Sin embargo, el aumento de las cuotas por el servicio de agua tanto a usuarios agrícolas como domésticos (más que los usuarios industriales, que ya tienen cuotas mucho más elevadas) es un imperativo que la sociedad debe afrontar ya.

d) *Riego y ensalitramiento de los suelos*. Probablemente el mayor peligro que corren los suelos irrigados de zonas áridas y semiáridas es la acumulación de sales solubles, que trae como consecuencia una disminución de los rendimientos de la mayoría de los cultivos. El proceso de acumulación es bien conocido: el agua de riego, en particular cuando se utilizan aguas subterráneas, que suelen tener un mayor contenido de sales solubles que las aguas de corrientes superficiales, es usada en los procesos evapotranspirativos de los cultivos, pero las sales en solución tienden a acumularse en las capas superficiales de los suelos. La escasa lluvia que se presenta en las zonas áridas y semiáridas, así como las láminas de "sobre-riego" que en ocasiones se adicionan al riego pueden lixiviar esas sales solubles hacia el subsuelo; pero si los niveles freáticos se mantienen cercanos a la superficie del suelo (sobre todo a menos de 1.5 m de profundidad), las sales solubles regresan a las capas superiores por ascensos capilares. El drenaje agrícola de las zonas de riego tiene como finalidad mantener abatidos los niveles freáticos, para evitar o disminuir los ascensos capilares de aguas freáticas salinas y prevenir de esta manera el ensalitramiento de los suelos. Sin embargo, en México, por diversas razones económicas y falta de apreciación de los beneficios del drenaje, sólo alrededor de 1% de la superficie de riego cuenta con drenaje subterráneo entubado. Debe hacerse notar que el drenaje colector existente, en forma de grandes zanjas con espaciamiento promedio de alrededor de 1 km, al que en principio deberían descargar los drenes parcelarios, también tiene un efecto en el abatimiento de los niveles freáticos y el control de la salinidad, pero su gran espaciamiento y su frecuente mal estado de conservación hacen que su acción desalinizadora sea limitada.

e) *Sistemas de riego y contaminación de acuíferos y cuerpos superficiales de agua*. Es prácticamente imposible evitar que una parte de las láminas aplicadas para riego se percole hasta los mantos freáticos, incluso en riego por goteo. Además, el agua percolada siempre contendrá sales solubles y residuos de los diversos agroquímicos que se utilizan en la agricultura, en particular residuos de fertilizantes nitrogenados, que suelen utilizarse en cantidades mucho mayores que otros agroquímicos. Las aguas percoladas pueden seguir dos caminos principales: salir por los sistemas de drenaje existente hacia los cuerpos de agua receptores de los efluentes de drenaje o percolarse hasta los acuíferos. Los sistemas de drenaje sólo son el conducto por el cual sales solubles y los residuos de agroquímicos llegan a los cuerpos de agua, contaminándolos. Este tipo de contaminación es diferente de la

ISSN 2007-2422

contaminación que ocasionan las aguas de drenaje urbano e industrial. Es también menos impactante a la vista (y al olfato), pero puede tener consecuencias catastróficas para el ambiente, como ha sido el caso de la contaminación del mar de Aral. Otro efecto negativo para el ambiente lo producen los fertilizantes nitrogenados, pues propician el desarrollo de algas en los cuerpos de agua, lo que a su vez enturbia y deteriora de varias formas el agua, lo que altera la vida acuática natural. Estos problemas los provoca no sólo el drenaje de zonas de riego, sino en general todo el drenaje agrícola, a través del cual los fertilizantes contenidos en sus aguas alcanzan ríos y lagos. En todos los países avanzados se están combatiendo estos problemas para regresar a los cuerpos de agua al estado que tenían antes de que se desarrollara exponencialmente el uso de fertilizantes a partir de la segunda mitad del siglo pasado. Otra parte del agua que se percola a los mantos freáticos no sale por los sistemas de drenaje, sino que continúa su camino de descenso hasta llegar a los acuíferos. Como se sabe, muchos sistemas de abastecimiento de agua utilizan aguas subterráneas, las cuales pueden estar contaminadas por residuos de agroquímicos, lo cual puede tener consecuencias en la salud humana y de los animales.

f) *Conflictos entre el uso agrícola del agua, y los usos industrial y municipal*. La agricultura de riego suele ser el usuario más importante de los recursos hídricos, aunque en varias zonas metropolitanas de nuestro país los sectores urbano e industrial ya sean más importantes que el sector agrícola. Con el crecimiento poblacional y el desarrollo de la economía se han agudizado en muchas partes los conflictos por el uso de los escasos recursos hídricos. En esta lucha, a la larga el sector agrícola tendrá que aumentar de forma considerable la eficiencia del manejo y deberá reducir el consumo de agua en beneficio de los usuarios domésticos e industriales, que de acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales (2013) tienen prioridad sobre los usuarios agrícolas. Estos ajustes demandarán fuertes inversiones para modernizar y tecnificar los sistemas de riego (y también los sistemas de abastecimiento de agua potable). Se debe reconocer que entre las medidas necesarias que tarde o temprano necesitarán tomarse, un lugar preponderante lo tendrá un necesario aumento en las tarifas que requieren pagarse por el servicio de riego, en particular cuando es por bombeo, así como por el servicio de agua potable. No existe mejor incentivo para manejar con más cuidado y eficiencia el agua que una tarifa que desanime el desperdicio.

Riego por gravedad y riego por bombeo

Al inicio, la agricultura de riego se desarrolló derivando agua directamente de los ríos. Después se construyeron sistemas de riego cada vez más complejos, formados por presas de almacenamiento, derivadoras y redes de canales para distribución de agua a las parcelas. Sin embargo, a medida que el agua de escurrimientos superficiales empezaba a escasear, se recurrió al bombeo de las aguas subterráneas. El costo de explotación del agua bombeada para la agricultura es superior al del agua derivada de ríos o presas, pues, por un lado, deben pagarse más derechos por el uso del agua subterránea que por el uso de agua superficial, según lo establece la Ley Federal de Derechos (2014). Sin embargo, lo que encarece más al agua subterránea son los costos del bombeo, los cuales dependen tanto del costo de la energía como de la profundidad de bombeo. Al respecto, en la actualidad hay regiones sobreexplotadas, como el Valle de México, el Bajío, y algunas áreas agrícolas del norte y noroeste del país, donde se tienen profundidades de bombeo que llegan a superar los 200 m. Davis y DeWiest (1966) señalan que el aprovechamiento del agua subterránea tiene grandes ventajas sobre los recursos superficiales, pues el agua subterránea presenta una composición química menos variable en el tiempo y los volúmenes almacenados en el subsuelo por

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 2, marzo-abril de 2016, pp. 5-16
• ISSN 2007-2422

lo general son mayores que los superficiales y su aprovechamiento es más fácil, al evitar largas conducciones y disponer de ella de inmediato. Se puede agregar también que ante el problema actual de contaminación, las aguas superficiales están más expuestas a este riesgo, que implicaría un costo adicional de tratamiento y conducción para su uso; por tal motivo, sigue siendo más económico extraer agua del subsuelo con menos impurezas para su uso, que no requiere de una inversión para su tratamiento.

Sin embargo, el riego que depende del agua subterránea se enfrenta a problemas crecientes debido a la sobreexplotación de los acuíferos. La presión sobre los acuíferos se ha incrementado debido a que, además de la extracción excesiva, los volúmenes de recarga por infiltración se han venido reduciendo a consecuencia de la deforestación y cambios de uso del suelo. Desde 1975 ha aumentado sustancialmente el número de acuíferos sobreexplotados: 32 en 1975, 36 en 1981, 80 en 1985, 97 en 2001 y 106 en 2013 (Semarnat-Conagua, 2014). Debido a la sobreexplotación, la reserva de agua subterránea del país se está minando a un ritmo de casi 6 km^3/año. A escala nacional, se estima que la recarga de los acuíferos es del orden de 77 km^3/año, de los cuales se calculan extracciones de 25.7 km^3/año, por lo que éstas equivalen a cerca de 33.3% de la recarga. Empero, tal cifra, que aparenta un balance positivo, es un promedio nacional que no revela la crítica situación que prevalece en algunos acuíferos de las regiones áridas, donde el balance es negativo. Entre los acuíferos sobreexplotados más importantes se pueden mencionar los de la Región Lagunera en el estado de Coahuila; los de Costa de Hermosillo, Guaymas y Caborca en el estado de Sonora; los de Celaya e Irapuato, en el estado de Guanajuato, así como los acuíferos del Valle de México.

Incertidumbre sobre la magnitud de la sobreexplotación: caso "acuífero Texcoco"

El primer problema que se tiene para combatir la sobreexplotación de los acuíferos es la gran incertidumbre en la estimación de los valores de los componentes del balance hidrológico y las características geohidrológicas de los acuíferos, a partir de las cuales se calculan los flujos subterráneos de entrada y salida de agua. Los problemas que se presentan para estimar la sobreexplotación de un acuífero se pueden ilustrar con el caso particular del acuífero Texcoco. Este acuífero es la principal fuente de abastecimiento de agua de 12 municipios de la parte oriental del Valle de México, con una población cercana a un millón y medio de habitantes. El desarrollo económico de esta región depende fuertemente de la posibilidad de alcanzar un manejo sustentable del acuífero. El conocimiento de un valor confiable de la sobreexplotación es completamente indispensable para poder elaborar e implementar un plan de manejo sustentable del acuífero (Escobar & Palacios, 2012).

Las cifras publicadas en el *Diario Oficial de la Federación* (DOF) en 2003 y 2009 (figura 1) muestran la gran incertidumbre que tienen los valores calculados de la recarga y extracciones en los acuíferos del Valle de México.

Así, este acuífero era en 2003 el más sobreexplotado de los 14 acuíferos del Valle de México, en donde la extracción de agua subterránea se estimaba nueve veces superior a la recarga. Sin embargo, en un estudio posterior llevado a cabo en 2007 (publicado en el DOF en 2009), la extracción se estimó mayor a la recarga en menos de 15%. Debe destacarse que esta enorme diferencia en las extracciones reportadas se debe en buena medida a que tanto el municipio de Ecatepec como la Delegación Iztapalapa, donde se extraen más de 300 hm^3/año, fueron reasignados del acuífero Texcoco a otros acuíferos vecinos. Se entiende menos el enorme aumento en la estimación de la recarga (de 49 hm^3/año en 2003, a 161 hm^3/año en 2007), ya que en este periodo no se han realizados trabajos significativos de recarga y las diferencias en estas cantidades se pueden deber más a la forma de determinarlas, ya que:

a) El cálculo de la evapotranspiración real, que se resta de la precipitación atmosférica para

ISSN 2007-2422

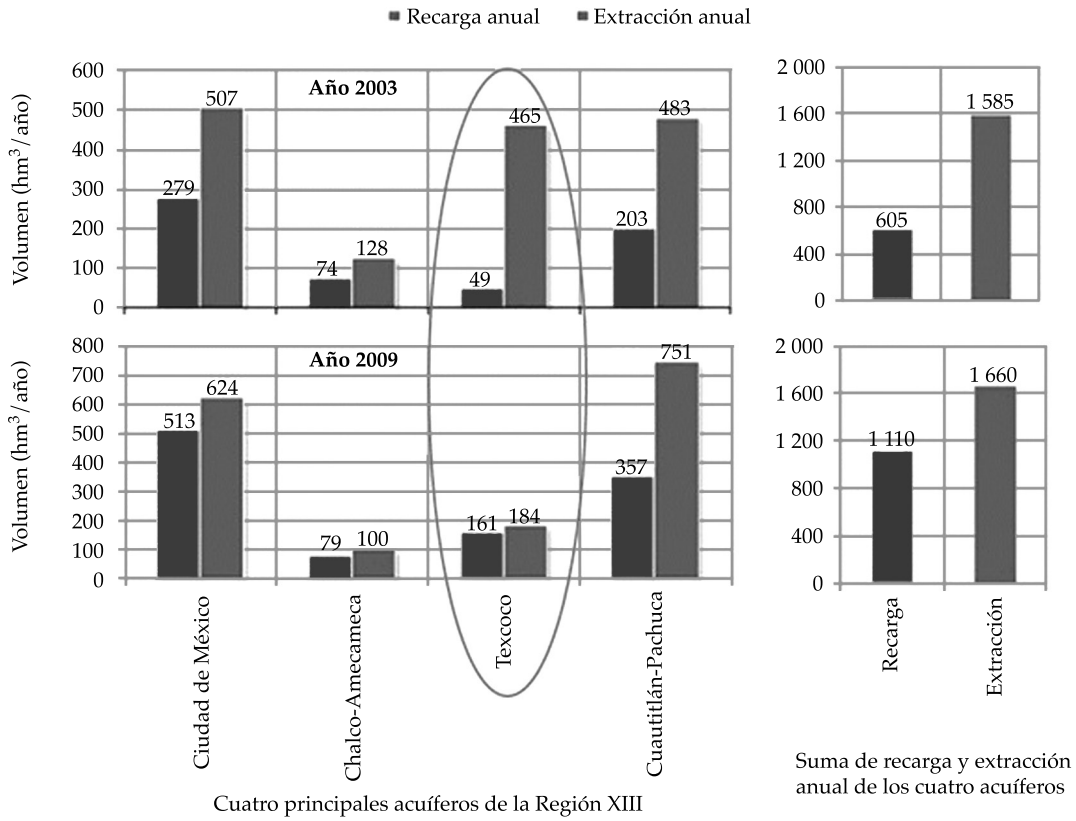


Figura 1. Comparación de la extracción y recarga de los principales acuíferos del Valle de México.

evaluar la recarga vertical, por lo general se determina mediante métodos poco precisos, como el método de Turc (Conagua, 2006). Debe agregarse que el empleo de métodos más precisos, como el de Penman-Monteith, se dificulta por la falta de la información requerida.

b) El cálculo de los flujos subterráneos mediante la ecuación de Darcy requiere del conocimiento del gradiente del potencial en las fronteras del acuífero y de la transmisividad, ninguno de los cuales se conoce de manera confiable.

c) El cálculo del volumen extraído se basa en un padrón incompleto y desactualizado de los pozos de bombeo, sin que se tenga una idea real de la cantidad de pozos clandestinos.

d) Con frecuencia no se tienen aforos de corrientes superficiales que permitan calcular tanto las entradas como salidas de agua superficial.

Métodos para evaluar el grado de sobreexplotación de un acuífero

La cuantificación del grado de sobreexplotación se puede determinar mediante dos enfoques (Escobar & Palacios, 2012):

a) El primer enfoque se basa en el estudio del balance hídrico del acuífero, de acuerdo con la ecuación general:

$$E - S = \Delta A \qquad (1)$$

• ISSN 2007-2422

donde:
E = entradas totales de agua al acuífero.
S = salidas totales de agua del acuífero.
ΔA = cambio de almacenamiento (sobreexplotación cuando $S > E$).

Por su parte:

$$E = \Delta P + E_{sub} + P_{RR} + P_{RDA} \quad (2)$$

donde:
ΔP = parte de la precipitación que se infiltra.
E_{sub} = entradas laterales de agua subterránea.
P_{RR} = pérdidas por infiltración en la red de riego.
P_{RDA} = pérdidas por infiltración en la red de agua potable.

$$S = B + S_{sub} + S_{sup} \quad (3)$$

donde:
B = extracciones de agua por bombeo.
S_{sub} = salidas laterales de agua subterránea.
S_{sup} = salidas por escurrimientos superficiales.

La sobreexplotación se presenta cuando se tienen más salidas de agua que entradas. Desafortunadamente, los componentes del balance hidrológico, exceptuando la precipitación atmosférica, suelen presentar muchos problemas en su medición o cálculo, en particular por la escasez y dudosa calidad de la información disponible. Además, para poder calcular las entradas y salidas subterráneas, se requiere del conocimiento de la transmisibilidad y sus variaciones en el acuífero, así como los niveles de agua en la periferia, para poder determinar gradientes y hacer cálculos de los flujos mediante la ley Darcy.

b) El segundo enfoque está basado en el análisis de la evolución de los niveles de agua del acuífero de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\Delta A = \pm \sum_{i=1}^{na} a_i h_i S_i \quad (4)$$

donde:
ΔA = cambio de almacenamiento (sobreexplotación cuando ΔA es negativo).
a_i = área asignada al i-ésimo sitio de observación.
h_i = evolución media o variación de la carga hidráulica en el pozo i.
S_i = coeficiente de almacenamiento.
na = número de elementos en que se divide el área de acuífero.

Si la tendencia de los datos de los niveles de agua es negativa, representa claramente el abatimiento del acuífero a través del tiempo. Para poder utilizar este método debe contarse con una red de pozos y piezómetros de observación de niveles de carga hidráulica y la realización de pruebas de bombeo para determinar el coeficiente de almacenamiento del acuífero. Para mayor información, véase Conagua (2007), y Escobar y Palacios (2012).

Posibles soluciones al problema de la sobreexplotación de acuíferos

A continuación se enlista una serie de medidas, clasificadas en estudios técnicos y acciones operativas, que pueden servir de base para elaborar un plan de manejo sustentable de un acuífero.

Estudios técnicos

- Actualización del censo de pozos de bombeo.
- Estimación de los volúmenes extraídos de los pozos clandestinos a partir de los datos sobre consumo de energía eléctrica.
- Estudios de los componentes del balance hidrológico.
- Establecimiento de una red de pozos y piezómetros de observación de niveles de carga hidráulica que se extienda hasta las fronteras del acuífero.
- Pruebas de bombeo para determinar la transmisibilidad y el coeficiente de almacenamiento del acuífero.

ISSN 2007-2422

Acciones operativas

- Promover la formación de un Comité Técnico de Aguas Subterráneas que se encargue del manejo del acuífero, incluyendo la identificación y cancelación de pozos clandestinos, así como vigilar que las extracciones no rebasen el volumen concesionado.
- Fomentar una cultura de pago por los servicios de agua tanto en ciudades como en zonas de riego.
- Reducción de los subsidios a los servicios de agua de riego y de abastecimiento urbano, así como de los subsidios al consumo de energía para el bombeo de agua.
- Obras de recarga artificial de acuíferos (reforestación, lagunas de recarga, pozos de absorción).
- Fomentar la captación y uso de agua de lluvia para consumo doméstico y agricultura de traspatio.

Referencias

Castro, J. E., Torregrosa-Armentia, M. L., Alle, A., Gómez-González-Cosío R., Vera, J., & Kloster, K. (2006). *Desarrollo institucional y procesos políticos*. IV Foro Mundial del Agua, México, D.F., marzo de 2006.

Conagua (2007). *Apoyo Técnico para la Actualización de la Disponibilidad del Acuífero Texcoco*. México, DF: Comisión Nacional del Agua.

Conagua (2006). *Estudio de modelación para determinar el comportamiento de los acuíferos Texcoco y Chalco-Amecameca*. México, DF: Comisión Nacional del Agua.

Davis, S. N., & DeWiest, R. J. (1966). *Hydrogeology*. New York: John Wiley.

Diario Oficial de la Federación (28 de agosto de 2009). Acuerdo por el que se da a conocer la ubicación geográfica de 371 acuíferos del territorio nacional, se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de 282 acuíferos, y se modifica, para su mejor precisión, la descripción geográfica de 202 acuíferos.

Diario Oficial de la Federación (20 de diciembre de 2013). Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican.

Diario Oficial de la Federación (31 de enero de 2003). Acuerdo por el que se dan a conocer los límites de 188 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, los resultados de los estudios realizados para determinar su disponibilidad media anual y sus planos de localización.

Escobar-Villagrán, B. S., & Palacios-Vélez, O. L. (abril-junio de 2012). Análisis de la sobreexplotación del acuífero Texcoco. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *3*(2), 67-84.

http://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.PCAP.CD.

http://www.answers.com/aral+sea?cat=travel&gwp=11&method=3&ver=2.3.0.609.

http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado.

http://www.un.org/esa/sustdev/documents/agenda21/english/agenda21toc.htm.

http://www.un.org/esa/sustdev/documents/docs_sdissues.htm.

Ley de Aguas Nacionales (2013). Última reforma publicada. *Diario Oficial de la Federación* 07-06-2013.

Ley Federal de Derechos (2014). *Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales*. México, DF: Comisión Nacional del Agua.

Raskin, P., Banuri, T., Gallopín, G., Gutman, P., Hammond, A., Kates, R., & Swart, R. (2002). *Great Transition: The Promise and Lure of the Times Ahead* (110 pp.). Boston, USA: Stockholm Environment Institute and Tellus Institute. Recuperado de http://www.tellus.org/.

Semarnat-Conagua (2014). *Estadísticas del Agua en México 2014*. México, DF: Semarnat, Conagua.

Dirección institucional de los autores

Dr. Oscar Luis Palacios-Vélez
Dr. Bernardo Samuel Escobar-Villagrán

Colegio de Postgraduados
Campus Montecillo, Km 36.5
56230 Carretera México-Texcoco, Estado de México, México
Teléfono: +52 (595) 9520 200, extensión 1173
opalacio@colpos.mx
esamuel@colpos.mx

Haga clic aquí para escribir al autor

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 2, marzo-abril de 2016, pp. 5-16
• ISSN 2007-2422

Sistemas de agua potable rurales. Instituciones, organizaciones, gobierno, administración y legitimidad

• Emmanuel Galindo* •
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México
*Autor de correspondencia

• Jacinta Palerm •
Colegio de Postgraduados, México

Resumen

Galindo, E., & Palerm, J. (marzo-abril, 2016). Sistemas de agua potable rurales. Instituciones, organizaciones, gobierno, administración y legitimidad. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *7*(2), 17-34.

Con información obtenida en campo para doce sistemas localizados en cinco municipios, analizamos tamaño o número de tomas servidas y tipo de organización, para su manejo, gobierno y administración, así como las reglas de acceso y exclusión al servicio de agua entubada. El objetivo es comparar cuáles pueden ser los modelos de gestión más apropiados, eficaces y legítimos, y en la práctica quién hace mejor las cosas: la profesionalización de la administración bajo la dirección de gerentes o los mismos usuarios con base en sistemas de conocimiento local. Las evidencias nos permiten afirmar que no existe una correlación directa entre número de tomas servidas y tipo de organización; varios sistemas pueden tener una sola administración centralizada; el arreglo institucional diseñado por los mismos usuarios presenta mayor legitimidad, y ello se traduce en eficiencia para aplicar las reglas de acceso y exclusión.

Palabras clave: organismos operadores descentralizados, direcciones municipales, comités de usuarios, autogestión, autogobierno, neo institucionalismo.

Abstract

Galindo, E., & Palerm, J. (March-April, 2016). Rural Drinking Water Systems. Institutions, Organizations, Government, Administration and Legitimacy. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 7*(2), *17-34.*

Field information obtained from 12 systems located in 5 municipalities was used to analyze the size or number of intakes supplied and the type of organization, for the purpose of management, governance and administration, as well regulations for access to and exclusion from piped water service. The objective was to compare management models to determine the ones that are most suitable, effective and legitimate. Two factors were compared for their contribution to improving conditions —professionalization of the administration under the direction of managers versus the users themselves based on local knowledge systems. According to the evidence, we can state the following: no direct correlation exists between the number of intakes supplied and the type of organization; various systems can have a single centralized administration; the institutional structure designed by the users themselves represent more legitimacy; and this affects the efficiency of applying the regulations related to access and exclusion.

Keywords: *decentralized operating entities, municipal departments, users committees, self-management, self-government, neo-institutionalism.*

Recibido: 19/02/2015
Aceptado: 22/10/2015

Introducción

En México existe una larga tradición en torno al estudio de las obras hidráulicas y su manejo (Bribiesca, 1958; Palerm, 1972), pero los pequeños sistemas de agua para consumo humano, ya sean rurales o urbanos, han sido poco abordados (Ávila, 1996, 2002; Burguete, 2000; Birrichaga, 2007; Galindo & Palerm, 2007).

Si bien los estudios de la gestión del agua urbana proporcionan importantes avances respecto a la administración y operación, así como sobre

las tarifas y su eficiencia financiera o acerca de la equidad en el abasto del servicio, hacen referencia sólo a la gran escala (Pineda, 1998, 2002, 2006; Martínez, 2002; Solís, 2005; Barkin, 2006; Soto, 2007; Saldívar, 2007), es decir, a ciudades, y poco se discute la pequeña escala, que bien puede llamarse agua potable rural.

Con el propósito de aportar al conocimiento del tema indicado, el objetivo del artículo es comparar cuáles pueden ser los modelos de gestión más apropiados, eficaces, legítimos, y con información obtenida en campo; documentar quién hace mejor las cosas: la profesionalización de la administración bajo la dirección de gerentes, ya sea en direcciones municipales u organismos operadores, o los mismos usuarios con base en un sistema de conocimientos locales para conformar comités de usuarios.

La emergencia de las OCSAS y los OLPE

La politóloga Elinor Ostrom (2011:7) afirmó de manera categórica que, a pesar de su enorme contribución, las organizaciones comunitarias que proveen servicios de aguas y saneamiento (OCSAS) son raramente discutidas en los textos sobre gobernabilidad y también enfatizó que el estudio sistemático de tales arreglos organizacionales resulta relevante, pues contribuyen de manera importante a lograr autogobierno local.

Respecto a América Latina, la Fundación AVINA (2015) reporta en su portal electrónico que tales organizaciones atienden entre 20 y 30% de la población en zonas rurales y periurbanas de los países que integran la región, que existen al menos 80 000 de ellas que operan de manera silenciosa y muchas veces en total desconocimiento de los tomadores de decisiones; de acuerdo con las cifras de organismos internacionales, la misma fundación estima que atienden a cuando menos 70 millones de personas en toda la región.

Sobre el modelo de gestión basado en organizaciones comunitarias, Enrique Aguilar (2011: 62) señala que si bien ésta no es la única opción para los sistemas rurales en América Latina, indica de manera puntual que efectivamente en algunos países es la opción preferida o la única disponible.

De lo anterior se desprende que son posibles otras formas organizativas para garantizar el abasto de agua doméstica en pequeña escala. Tales son los casos de los operadores públicos, privados o mixtos, que dotan del servicio en áreas rurales, periurbanas y pequeñas localidades urbanas con menos de 30 000 habitantes, conocidos como organismos operadores de pequeña escala (OLPE) y de los cuales también se tienen referencias importantes (Banco Mundial, 2008; Aguilar, 2011).

Para el caso específico de México y de esta contribución en particular, como ya se dijo, interesan los sistemas que abastecen a pequeños centros de población y que son manejados ya sea por comités de usuarios, direcciones municipales u organismos operadores.

Sobre la emergencia de estudios sociales acerca de las OCSAS y los OLPE, se puede decir que quizá se deba a que en los últimos años los sistemas de agua potable rural han llamado la atención a causa de la controversia que ha generado la municipalización de los mismos en algunas entidades del país (Galindo & Palerm, 2007; López, Martínez, & Palerm, 2013; Vargas, 2015). Muestra de ello es la creciente cantidad de notas periodísticas en diarios de circulación nacional y local (Sánchez, 2015).

Además de la controversia entre organizaciones comunitarias y municipios, otras publicaciones han documentado el manejo que hacen los comités de usuarios frente a los organismos operadores o direcciones municipales (Sandoval, 2011; Pimentel, Velázquez, & Palem, 2012; Galindo & Palerm, 2012), así como la participación o no de las mujeres en la toma de decisiones para la gestión comunitaria del agua (García & Vázquez, 2013; Gutiérrez, Nazar, Zapata, Contreras, & Salvatierra, 2013); el consenso indica que, en general, la autogestión incluye principios democráticos, así como eficiencia en la aplicación de las reglas y acuerdos.

• ISSN 2007-2422

Municipio, descentralización o autogestión. El caso hidalguense

Antes de entrar en materia resulta pertinente definir lo que de manera oficial se entiende por sistema de agua potable rural. De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (Conagua), este tipo de abasto se refiere a la cobertura de agua potable en centros de población con menos de 2 500 habitantes, para los que se ha implementado una política pública a través del Programa para la Sostenibilidad de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento en Comunidades Rurales (Prosappys).

Tal programa está vigente desde 1999 y tiene como finalidad modernizar los sistemas de agua doméstica. A manera de ejemplo, basta decir que en su versión 2014 tuvo como objetivos brindar el servicio a 600 000 habitantes, y dotar de saneamiento a otros 390 000 en zonas rurales y marginadas, promoviendo la gestión comunitaria de los sistemas (Conagua, 2014).

Respecto al marco jurídico que norma la dotación de agua para uso doméstico, es pertinente señalar que las dos últimas décadas del siglo pasado representan un punto de inflexión, pues se dieron cambios legales que hacen de competencia obligada de los ayuntamientos la administración y operación, así como el mantenimiento de los sistemas de agua entubada localizados en su jurisdicción municipal (Procuraduría Agraria, 1992; Conagua, 2004).

No obstante lo anterior, algunos estudiosos del tema señalan que los gobiernos estatales han legislado sobre la posibilidad de que los usuarios mantengan la administración en la pequeña escala. Como ejemplo, Jacinta Palerm (2014) menciona a Chihuahua, Guanajuato, San Luis Potosí o Tabasco, y advierte que las variaciones entre una entidad federativa y otra resultan significativas.

Como se puede apreciar, el debate respecto al marco jurídico nacional en torno al manejo del agua para uso doméstico y su implementación en los territorios de las entidades federativas resulta por demás interesante, pero ahora queremos llamar la atención en específico sobre los arreglos institucionales y organizacionales que hacen posible el abasto de agua para consumo humano en pequeños centros de población del estado de Hidalgo.

Para el caso hidalguense, el marco legal nacional se complementa con la Ley Estatal de Agua y Alcantarillado de 1999 y su respectivo Reglamento (Periódico Oficial del Estado de Hidalgo, 1999). De tal manera que el arreglo institucional resultante para dicha entidad federativa es claro, al establecer que el abasto de agua para uso doméstico es un servicio público que estará a cargo sólo de cinco tipos de prestadores de servicios públicos de agua y alcantarillado: municipios, organismos operadores, organismos operadores intermunicipales, Comisión Estatal del Agua, o los concesionarios, al mostrar el acta constitutiva avalada por un notario público, donde se indique el nombre y registro federal de contribuyentes de la persona física o moral en cuestión (Galindo & Palerm, 2012; Rodarte, Galindo, Díaz, & Fernández, 2012).

Si bien en el papel tal arreglo institucional y las organizaciones que origina parecen adecuados, las evidencias encontradas en campo muestran que también es frecuente la presencia de organizaciones comunitarias conocidas como comités de usuarios, los cuales, en general, se conforman y operan al margen de la legislación vigente.

Metodología

Con información de campo comparamos tamaño medido como número de tomas servidas por un sistema y tipo de organización para el manejo de 12 de ellos. También comparamos gobierno, administración y operación, así como legitimidad de las reglas y organizaciones encargadas de hacerlas cumplir.

Para identificar el tipo de gobierno, se puso atención en la capacidad para la toma de decisiones al igual que en la facultad para emitir órdenes en torno al manejo de un sistema o sistemas a cargo de una organización específica. Desde el inicio de la investigación tomamos en

ISSN 2007-2422 • *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. VII, núm. 2, marzo-abril de 2016, pp. 17-34

cuenta que el gobierno puede estar acotado por la legislación vigente, o por reglas y limitaciones establecidas por los mismos usuarios. Por tanto, clasificamos como sistemas con autogobierno a los que son manejados por los usuarios con base en un sistema de conocimientos locales, y como sistemas con burocracia a los que son dirigidos por direcciones municipales u organismos operadores diseñados a partir de la normatividad emanada del marco legal vigente en materia de agua potable.

El análisis de la administración se concentró en un conjunto de actividades, como asignación de contratos; cobro por el servicio y multas establecidas; resolución de conflictos; pago por consumo de energía eléctrica y de nómina del personal empleado cuando es el caso; compra de insumos para mantenimiento de la infraestructura; pago de la renta de oficinas y el servicio telefónico en los casos respectivos, así como elaborar y enterar la contabilidad del sistema o los sistemas de agua entubada que administra una organización en particular.

Las actividades de operación, que se diferencian de las que hace el personal de oficina, incluyen la extracción de aguas subterráneas por medio de pozos profundos equipados con bombas eléctricas o, en su caso, entubar el agua de un manantial; distribución del agua a las tomas servidas mediante un sistema de tubería en red y tanques de almacenamiento; mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura y equipos; instalación o suspensión de una toma, y cuando es el caso, la medición periódica del agua que se consume en cada una de ellas para calcular el cobro respectivo.

Para identificar las reglas de acceso y exclusión de un sistema en específico concentramos la atención al conjunto de acuerdos y reglamentos sin importar que fuesen escritos o no. Con ello fue posible documentar el procedimiento en que un individuo adquiere la categoría de usuario, así como las causas por las cuales el mismo individuo puede perder tal categoría.

A fin de indagar sobre la legitimidad de las reglas y organizaciones encargadas de hacerlas cumplir, se puso especial atención en dos aspectos. Primero, quienes diseñan las reglas y dónde se emiten. Segundo, quienes designan o eligen a las personas encargadas de aplicar las reglas, lo mismo que la jurisdicción o ámbito de influencia para ello.

Ya en campo, la información necesaria la recopilamos mediante entrevistas formales e informales tanto con administradores como con operarios. Para ello se realizaron recorridos de campo, con el objeto de identificar la infraestructura hidráulica de cada sistema en particular y registrar las tareas que lleva a cabo el personal operativo para garantizar la extracción y distribución del agua, lo mismo que el mantenimiento y rehabilitación de los equipos y red de tubería. Por último, a fin de identificar y documentar las tareas administrativas del personal de oficina hicimos visitas *in situ* los días de la semana en que labora dicho personal.

Resultados y discusión

Tamaño y tipo de organización

Los datos del cuadro 1 muestran que en los cinco municipios elegidos como zona de estudio existen cuando menos 46 sistemas de agua entubada en un rango que va de 144 a 3 000 tomas servidas; 34 de ellos están a cargo de comités de usuarios; ocho bajo la dirección de direcciones municipales, y sólo cuatro son manejados por organismos operadores descentralizados del municipio respectivo. Tales evidencias nos permiten afirmar que en pequeña escala es posible encontrar sistemas manejados por organizaciones de tipo burocráticas como por organizaciones de tipo autogestivas.

El cuadro 2 resume los 12 sistemas analizados, así como el tipo de organización que los tiene a su cargo. De acuerdo con los datos mostrados, podemos afirmar que por el número de tomas servidas, los sistemas que se estudiaron son de pequeña escala, pues diez de ellos oscilan entre 500 y 2 500 tomas, y sólo dos salen de dicho rango: Santa María y El Rincón, con 3 080 y 144, respectivamente.

• ISSN 2007-2422

Cuadro 1. Organizaciones y sistemas de agua entubada en la zona de estudio.

Municipio	Tipo de organización	Organizaciones	Sistemas que maneja
Ajacuba	Dirección municipal	1	3
	Comité de usuarios	1	1
Arenal	Dirección municipal	1	2
	Comité de usuarios	4	4
Cardonal	Organismo operador	1	1
	Comité de usuarios	10	11
San Salvador	Dirección municipal	1	3
	Organismo operador	1	2
	Comité de usuarios	9	9
Santiago A.	Comité de usuarios	10	10
	Totales	**39**	**46**

Fuente: elaborado con datos de campo.

Cuadro 2. Tomas servidas por sistema y tipo de organización para su manejo.

Sistema	Tomas	Organización	Sistema	Tomas	Organización
San Salvador Santa María	560 3 080 **3 640**	Comisión de Agua y Alcantarillado del Municipio de San Salvador Hidalgo (CAAMSSH)	Pozo 2	144 **144**	Comité de Usuarios de El Rincón (CUR)
Cardonal	650 ***650***	Organismo Operador de Cardonal (OOC)	Santiago de Anaya	980 ***980***	Comité de Usuarios de Santiago de Anaya (CUSA)
Ajacuba Tezontlale Tecomatlan	2 286 1 242 1 097 ***4 625***	Dirección Municipal del Agua Potable de Ajacuba (DMAPA)	Yolotepec	700 **700**	Comité de Usuarios de Yolotepec (CUY)
20 de Nov. Bocja-Chimilpa	1 479 454 ***1 933***	Dirección de Agua Potable del Municipio El Arenal (DAPMA)	San Miguel Tlazintla	1 697 ***1 697***	Comité de Usuarios del Sistema San Miguel Tlazintla (CUSMT)

Fuente: elaborado con datos de campo.

Lo anterior permite refutar, para los sistemas de agua potable analizados y para los municipios en cuestión, que la escala o número de tomas servidas no tiene correlación directa con el tipo de organización que lo maneja.

Así, con los argumentos hasta aquí presentados, es posible afirmar que en la zona de estudio se ha implementado de manera diferenciada el marco institucional emanado de la legislación nacional y estatal en materia de agua para uso doméstico. Toda vez que en campo se encuentran casos como Santiago de Anaya, un municipio donde la totalidad de sistemas son manejados por comités de usuarios, o San Salvador, donde coexisten una dirección municipal, un organismo operador y nueve comités de usuarios.

ISSN 2007-2422

Gobierno, administración y operación

En los cuatro sistemas manejados por comités, los mismos usuarios se encargan de la administración del servicio del agua entubada y de la operación de la infraestructura respectiva.

A fin de garantizar que se realicen todas las tareas demandadas por la administración en tales sistemas, los usuarios conforman un tipo de organización, cuyos cargos honoríficos son por elección y se rotan cada determinado tiempo entre los titulares de las tomas servidas. Para las tareas propias de la operación se identificaron dos mecanismos: el más común consiste en nombrar de entre los mismos usuarios a una o dos personas, quienes a su vez reciben una compensación monetaria por las actividades que realizan en el sistema respectivo; el otro se basa en el trabajo no remunerado, conocido localmente como *faena*, y se ejecuta entre todos los usuarios con base en trabajos programados de manera previa por el comité en funciones.

En los otros ocho sistemas, todas las tareas de administración y operación son hechas por personal de tiempo completo que es contratado para laborar por un periodo determinado, ya sea en una dirección municipal del agua potable o en un organismo operador, según sea el caso, si el sistema en cuestión está a cargo del ayuntamiento o de una Junta de Gobierno.

Sistemas con autogestión

Como se indica en el cuadro 3, para la operación de los sistemas Yolotepec y Santiago de Anaya, el comité de administración respectivo nombra a dos usuarios, uno de ellos se encarga de manejar el equipo de bombeo y la distribución del agua, el otro del mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura. En el sistema El Rincón es un solo usuario quien hace ambas tareas. En el sistema San Miguel Tlazintla demanda el trabajo no remunerado de todos los usuarios con base en un calendario para rotar el trabajo recurrente o extraordinario, según sea el caso.

En el cuadro 3 también se indica que la asamblea general de usuarios delega autoridad al comité de administración en turno y que tanto las tareas de oficina como las de operación las coordinan los respectivos comités. Tres de los cuatro sistemas con autogobierno han generado esquemas organizativos por barrios o manzanas de acuerdo con la división territorial de la localidad de que se trate, y el San Miguel Tlazintla, que abastece a ocho localidades, tiene dos niveles organizativos: uno comunitario y otro multicomunitario.

A los operarios en este tipo de sistemas se le especifica el trabajo a realizar y sus obligaciones, así como sus responsabilidades y ámbito de autoridad; es decir, están bajo un sistema de supervisión y subordinación, pero no en cadena de mando. Esto último, porque son una o dos personas las involucradas. Quienes hacen las funciones de pocero o fontanero necesariamente tienen que ser usuarios del sistema en cuestión, y para ello tampoco es necesario cubrir un perfil técnico o profesional previamente establecido.

Sistemas con burocracia

La información del cuadro 3 indica que ocho sistemas son manejados por organizaciones burocráticas emanadas de la legislación estatal y nacional vigentes, ya sean direcciones municipales u organismos operadores descentralizados del municipio.

De acuerdo con lo anterior, se puede afirmar que por mandato de los artículo 25 y 38 de la Ley de Agua y Alcantarillado del Estado de Hidalgo, el presidente municipal en turno tiene a su cargo la contratación del director o gerente de la dirección municipal del agua potable o del organismo operador, según sea el caso (POEH, 1999: 13-16). Además, también participa en la toma de decisiones respecto al número de personas que se contratan para la administración, operación y mantenimiento, así como en el monto de sus salarios y tiempo que permanecen en funciones.

Bajo el esquema descrito, resulta que los ayuntamientos de El Cardonal y San Salvador han transferido las tareas de administración y

• ISSN 2007-2422

operación a sus respectivos organismos operadores, pero mantienen el gobierno sobre ellos y por eso, a través del presidente municipal en turno, participan de modo directo en la toma de decisiones.

En los sistemas gobernados por ayuntamientos es la tesorería del municipio respectivo la responsable de cubrir los gastos en que se incurre para su manejo, que en general son tres: nómina del personal empleado en la dirección del agua potable; energía eléctrica que se utiliza en la extracción y distribución del agua; material para el mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura hidráulica.

En el caso del Arenal, la tesorería municipal también cobra la tarifa por el servicio del agua entubada y sólo se auxilia del área de recaudación de rentas para el trámite y entrega de los contratos para un nuevo servicio. En Ajacuba, las dos secretarias que laboran en la dirección de agua potable realizan el cobro por el servicio de agua entuba, el trámite y asignación de nuevos contratos, además de tener la obligación de entregar un corte de caja a la tesorería municipal y reportar los ingresos obtenidos en los tres sistemas a su cargo.

Así, una pequeña burocracia tiene a su cargo la administración y operación de los sistemas que manejan las direcciones municipales del agua potable. Tal burocracia es contratada por el ayuntamiento en turno y por ello forma parte del personal de oficina en las presidencias municipales.

En los dos sistemas manejados por el organismo operador de San Salvador, la administración la realiza una tecnocracia. El personal de oficina, que incluye un profesional en contabilidad y otro en sistemas informáticos, está a cargo de la Subdirección Administrativa y la Subdirección Comercial, respectivamente. La primera lleva la contabilidad, nómina, pago de la energía eléctrica y renta de oficinas, así como la cartera de proveedores. La segunda tiene como función medir el consumo de agua en cada una de las tomas servidas, determinar el monto a cobrar y hacer el cobro respectivo.

Para el caso de El Cardonal, la contabilidad del organismo operador la realiza un despacho contable que se emplea para esa tarea específica; el subdirector y la secretaria se encargan de tramitar los nuevos contratos para el servicio de agua entubada y de hacer los cobros por el suministro del servicio. Al momento de la entrevista, el personal contratado no se integraba por profesionales o técnicos, pero la Ley de Aguas del Estado de Hidalgo señala que en los organismos operadores se debe contratar a profesionales en la materia con experiencia comprobada; por tanto, se puede sostener que la estructura administrativa de tal sistema está diseñada para ser manejada por una tecnocracia.

Para terminar este apartado, es preciso dejar en claro que tanto en los sistemas con autogestión como en los burocratizados, las tareas de administración y operación están diferenciadas, y que en las dos situaciones es poca o nula la rotación del personal operativo, el cual se integra en general por poceros y fontaneros. Los primeros se encargan de la operación de las bombas hidráulicas instaladas en los pozos respectivos, así como de verificar los niveles de agua al momento de llenar los depósitos repartidores. Los segundos son responsables del mantenimiento del sistema de tubería en red y del mantenimiento menor en las válvulas reguladoras de la presión del agua.

El caso de los administradores es totalmente opuesto al de los operarios por la alta rotación de personal empleado en las direcciones municipales o los organismos operadores. La razón de ello es que cada tres años se elige un nuevo cabildo, y en general se nombra un nuevo gerente o director, según sea el caso, con sus respectivos subdirectores, donde éstos forman parte de la estructura administrativa. También los comités tienen altos niveles de rotación, pues se conforman por cargos honoríficos que forzosamente deben ser ocupados por los usuarios; una vez que se adquiere la categoría de usuario en alguno de los sistemas estudiados también se tiene la obligación de formar parte del comité de administración cuando así lo decida la asamblea de usuarios.

ISSN 2007-2422 • *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. VII, núm. 2, marzo-abril de 2016, pp. 17-34

Cuadro 3. Características de las organizaciones que manejan los sistemas estudiados.

Organización (sistemas)	Gobierno/ administración	Cadena de mando	Personal contratado	Organización (sistemas)	Gobierno/ administración	Cadena de mando	Usuarios remunerados
CAAMSSH (2)	Junta Tecnocracia	Junta Director Subdirector Jefe de Área Oficinistas Operarios	- 1 3 3 6 10 **23**			Usuarios Comité Operarios	- 0 1 **1**
OOC (1)	Junta Burocracia	Junta Director Subdirector Oficinistas Operarios	- 1 1 1 5 **8**	CUSA (1)	Usuarios Autogestión	Usuarios Comité Operarios	- 0 2 **2**
DMAPA (3)	Ayuntamiento Burocracia	Ayuntamiento Director Subdirector Oficinistas Operarios	- 1 1 2 13 **17**	CUY (1)	Usuarios Autogestión	Usuarios Comité Operarios	- 0 2 **2**
DAPMA (2)	Ayuntamiento Burocracia	Ayuntamiento Director Operarios	- 1 5 **6**	CUSMT (1)	Usuarios Autogestión	Usuarios Comités Operarios	- 0 0 **0**

Fuente: elaborado con datos de campo.

Reglas y acuerdos. Su legitimidad y equidad

Como se indica en el cuadro 4, las direcciones municipales y los organismos operadores se rigen por la legislación del marco jurídico vigente en materia de aguas. Por el contrario, los comités se manejan por los acuerdos que se toman en asambleas generales de usuarios y en el caso del sistema San Miguel Tlazintla por un reglamento elaborado por los mismos usuarios.

Lo anterior tiene implicaciones en cada uno de los doce casos analizados, pues las reglas de acceso y exclusión se definen con base en los arreglos institucionales que los rigen. También, como se indica en el mismo cuadro, los usuarios de los cuatro sistemas autogobernados establecen el tipo y monto de las cuotas que se cobra por el servicio de agua entubada. Esta última situación no sucede en los sistemas manejados por direcciones municipales u organismos operadores, toda vez que la Ley Estatal de Agua Potable y Alcantarillado establece en su artículo 134 que le corresponde al Congreso del estado aprobar el tipo y monto de las tarifas que tales organizaciones cobran por dicho servicio (POEH, 1999: 37).

Sistemas con autogestión

De acuerdo con las reglas establecidas en este tipo de sistemas se reconocen dos categorías de usuarios: nacido en la localidad o avecindado. Este último es para designar a la persona que llega como nuevo habitante a una de las localidades abastecidas por el sistema respectivo y solicita el servicio de agua entubada.

• ISSN 2007-2422

En los cuatro sistemas estudiados, la categoría de avecindado sirve como mecanismo para regular el acceso tanto al servicio de agua entubada como a la localidad en cuestión. Lo anterior porque la persona no nacida en la localidad tiene que solicitar su acceso al sistema con el comité de administración respectivo y su acceso a la localidad con el representante legal de la misma, quien puede ser un delegado municipal, comisariado ejidal o comisariado de bienes comunales, según el caso. Una vez que la persona no nacida en la localidad tiene acceso al sistema de agua entubada también adquiere la categoría de avecindado de la localidad en cuestión.

El procedimiento y requisitos para que un posible usuario adquiera la categoría de avecindado es el siguiente: el comité de administración en turno tiene un registro histórico del trabajo comunitario y de las cooperaciones monetarias que cada usuario ha aportado para el sistema en cuestión, y el representante legal de la localidad también lleva un control de las faenas y cooperaciones monetarias que cada ciudadano aporta para las mejoras de la misma. Con base en tales registros, el representante legal de la localidad respectiva determina la cantidad monetaria que debe pagar la persona no nacida en dicha localidad, para ser considerado como avecindado de ella, y le corresponde al comité de administración determinar las condiciones de su acceso al sistema de agua entubada, para lo cual toma en cuenta los registros mencionados y el monto del contrato respectivo.

El procedimiento descrito hace que el usuario con la categoría de avecindado aporte una cantidad de dinero para, de alguna manera, compensar las cooperaciones monetarias y el trabajo comunitario que realizaron por anticipado los usuarios con la categoría de nacido en la localidad.

Como se muestra en el cuadro 4, los usuarios de los sistemas Yolotepec y Santiago de Anaya han establecido subdivisiones para la categoría de usuario nacido en la localidad, y con ello aplican costos diferenciados a quien solicita el contrato de una nueva toma de agua bajo esa categoría. En el primer sistema, la participación con faenas y cooperaciones es el criterio utilizado para establecer el monto que paga una persona nacida en la localidad por un contrato de una toma de agua entubada. En el segundo, el criterio utilizado es ocupar cargos honoríficos en alguno de los comités de la localidad, como el comité del agua potable, el consejo de colaboración o el patronato de las festividades religiosas.

En el sistema San Miguel Tlazintla, los usuarios han establecido un mecanismo para compensar la participación de quien asume alguna responsabilidad en las tareas propias de la administración. Lo anterior, porque todos los usuarios menores de 60 años, mujeres u hombres, están obligados a formar parte de alguno de los 10 comités que existen, y también lo están para realizar las faenas necesarias a partir de los 18 años de edad. Bajo tal arreglo institucional, el usuario que ocupa el cargo de presidente del comité general o el cargo de presidente del consejo de vigilancia queda exento, de por vida, para realizar faenas o para formar parte de alguno de los 10 comités, sin importar la edad que tenga al momento de asumir el cargo.

El cuadro 5 resume las reglas para conservar la categoría de usuario en los sistemas con autogobierno y, como se indica, en los denominados El Rincón y Yolotepec. Tales requisitos son los siguientes: hacer las faenas necesarias para las mejoras del sistema respectivo; aportar las cooperaciones monetarias cuando son requeridas; pagar la cuota mensual o anual, según sea el caso, por concepto del servicio de agua entubada. En el Sistema Santiago de Anaya no se hacen faenas ni se aportan cooperaciones monetarias, el único requisito es pagar la cuota anual por el servicio de agua entubada y la cuota anual para cubrir los gastos imprevistos.

El sistema San Miguel Tlazintla sobresale entre los anteriores, porque para mantener la categoría de usuario se antepone el requisito de hacer las faenas al de pagar la cuota anual. Es decir, en dicho sistema resulta más útil el trabajo manual que aporta cada uno de los usuarios para el mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura hidráulica, que el pago mone-

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 2, marzo-abril de 2016, pp. 17-34
ISSN 2007-2422

Cuadro 4. Marco institucional y organizacional. Tipología de usuarios, tarifas y costos.

Organización, fundamento legal	Tipo de usuario	Tarifa ($)	Costo de toma ($)
CAAMSSH Ley Estatal de Agua Potable y Alcantarillado del estado de Hidalgo Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento	 Doméstico Pensionado Comercial Industrial Tandeo Toma muerta	Mensual 46.00 23.00 132.00 324.00 55.00 17.00	Contrato e instalación 800.00
OOC Ley Estatal de Agua potable y Alcantarillado del estado de Hidalgo Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento	Doméstico Comercial	Mensual 50.00 150.00	Contrato e instalación 2 000.00
DMAPA Ley Estatal de Agua Potable y Alcantarillado del estado de Hidalgo Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento	Doméstico Comercial Industrial	Mensual 50.00 50.00 50.00	Contrato 300.00
DAPMA Ley Estatal de Agua Potable y Alcantarillado del estado de Hidalgo Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento	Doméstico Comercial Industrial	Mensual 40.00 40.00 40.00	Contrato 800.00
CUR Acuerdos en asamblea de usuarios	Avecindado Originario	Mensual Variable	Contrato e instalación 3 920.00 1 320.00
CUSA Acuerdos en asamblea de usuarios	Avecindado Originario sin cargos Originario con cargos	Anula Fija 500.00 Imprevistos 150.00	Contrato e instalación 10 000.00 5 000.00 3 000.00
CUY Acuerdos en asamblea de usuarios	Avecindado Originario que no participa Originario que sí participa	Mensual Fija 45.00	Contrato e instalación 1 000.00 1 000.00 500.00
CUSMT Reglamento interno	Doméstico En hidrante público	Anual Fija 120.00 50.00	900 salarios mínimos Faenas

Fuente: elaborado con datos de campo.

tario de la cuota anual por el servicio de agua entubada.

Como se apunta en el cuadro 5, entre las sanciones impuestas por los usuarios de los sistemas El Rincón y San Miguel Tlazintla está la exclusión del usuario.

Por el contrario, en los sistemas Yolotepec y Santiago de Anaya no está presente la exclusión, pero ello no quiere decir que los usuarios respectivos incumplan con las reglas y acuerdos establecidos. Lo anterior, porque si bien un usuario de este último sistema puede dejar de pagar el servicio de agua entubada por el tiempo que quiera, al momento que desee regularizar su situación, el cobro diferido se realiza con base en la tarifas vigentes, mismas que se actualizan cada tres años. En el caso del primer sistema, al momento de la entrevista había usuarios con

• ISSN 2007-2422

Cuadro 5. Reglas de acceso y exclusión.

Organización	Acceso	Faltas y sanciones
CAAMSSH	Constancia de autoridad comunitaria Contrato Pago de tarifa Pago de material	No se aplican las sanciones establecidas en la Ley Estatal de Agua Potable y Alcantarillado
OOC	Constancia de autoridad comunitaria Contrato Pago de tarifa Pago de material	$10.00 por no pago en los primeros diez días del mes $200.00 por adeudo de un mes $2 200.00 por adeudar dos meses consecutivos. Incluye costo de nuevo contrato y reconexión
DMAPA	Constancia de autoridad comunitaria Contrato Pago de tarifa Pago de material	No se aplican las sanciones establecidas en la Ley Estatal de Agua Potable y Alcantarillado
DAPMA	Constancia de autoridad comunitaria Contrato Pago de tarifa Pago de material	No se aplican las sanciones establecidas en la Ley Estatal de Agua Potable y Alcantarillado
CUR	Constancia de autoridad comunitaria Contrato Faenas Cooperaciones Pago de cuota Pago de material Formar parte del comité de administración al menos una vez	$10.00 de multa por día a partir del cuarto día de cobro $150.00 por adeudo de tres meses consecutivos Desconexión: $200.00 Reconexión: $150.00 Toma clandestina, se retira y se niega el servicio
CUSA	Constancia de autoridad comunitaria Contrato Pago de cuota Pago de material Formar parte del comité de administración al menos una vez	Adeudo mayor a tres años, se actualizan los pagos anuales a la tarifa vigente
CUY	Constancia de autoridad comunitaria Contrato Faenas Cooperaciones Pago de cuota Pago de material Formar parte del comité de administración al menos una vez	No hay sanciones, pero el comité que termina su periodo no debe dejar adeudos al nuevo comité
CUSMT	Constancia de autoridad comunitaria Faenas Cooperaciones Pago de cuota Pago de material Formar parte del comité de administración al menos una vez	Los adeudos en el pago del servicio se cobran al doble de la cuota vigente Cinco salarios mínimos por fugas de agua dentro o fuera de la vivienda, y si reincide dos veces se suspende el servicio

Fuente: elaborado con datos de campo.

ISSN 2007-2422

adeudos de hasta cuatro meses consecutivos, ya que no existen sanciones para quien se retrasa en pagar la cuota, e incluso el pago se puede hacer al final del periodo de administración del comité en turno, pero no se permite más retraso, pues el comité que termina sus funciones debe dejar sin adeudos al comité entrante.

El hecho de que existan usuarios con adeudos no afecta el funcionamiento de los sistemas Yolotepec o Santiago de Anaya, ya que alguno o algunos de los integrantes del comité de administración respectivo pueden prestar dinero cuando no es suficiente el que se tiene en caja. Incluso los integrantes de dichos comités pueden solicitar un préstamo de dinero a otro usuario del sistema y liquidar el adeudo al final del año lectivo o hasta terminar el periodo por el que fueron electos.

Por otro lado, aun cuando en los sistemas El Rincón y San Miguel Tlazintla existe la posibilidad de suspender la toma a un usuario, esto no es frecuente, y según las entrevistas, los comités de administración en turno no habían ejercido tal sanción. Las razones de ello en el primer sistema es que es raro que se instalen tomas clandestinas, pues los habitantes de esa localidad también se abastecen con pozos artesianos, y los recargos y multas establecidas hacen eficiente la recaudación de la cuota mensual. En el sistema San Miguel Tlazintla prevalecen las faenas sobre el pago de la cuota anual por el servicio de agua entubada, y si bien los ocho pueblos que abastece dicho sistema tienen altos índices de migración, los usuarios ausentes pagan a una persona de la localidad para que realice en su lugar las faenas correspondientes; de esa manera, el usuario ausente garantiza su derecho de pertenecer al mismo.

Por lo expuesto en este apartado, podemos asegurar que el cumplimiento de las reglas establecidas y la legitimidad de los comités de usuarios, así como la del personal operativo, contribuyen para que no se aplique la sanción máxima en los sistemas autogobernados: la exclusión. Así, los arreglos institucionales diseñados por los mismos usuarios resultan eficientes para lograr el objeto de la organización creada: el abasto de agua para consumo humano.

Con la información presentada demostramos que las instituciones informales, es decir, los acuerdos no escritos que se toman en las asambleas de usuarios, son reglas de juego eficientes para el manejo de los sistemas de agua entubada, en este caso vistos como un recurso de uso común, las cuales permiten a los usuarios de dichos sistemas mantener el gobierno de ellos y conformar organizaciones de tipo no burocrático para su administración y operación.

Finalmente, sobre los sistemas autogestivos, podemos asegurar que en ninguno de los casos analizados se tienen instalados aparatos medidores para regularizar el consumo de agua y tampoco se han fijado las tarifas establecidas en la legislación estatal en la materia. En lugar de tales mecanismos, se tienen acuerdos que impiden el consumo excesivo o desperdicio del agua, lo mismo que un conjunto de tarifas establecidas acorde con las necesidades de cada sistema en específico.

Sistemas con burocracia

Para los sistemas manejados por direcciones municipales u organismos operadores, la Ley Estatal de Agua Potable y Alcantarillado, en su artículo tercero, define cuatro tipos o categorías de uso de las aguas: comercial, industrial, doméstico y público (POEH, 1999: 3).

Sobre el cobro por el servicio de agua entubada, la misma ley dice que la tarifa es la tabla autorizada para la fijación del pago por cada tipo de usuario, para lo cual se considera el nivel de consumo y los precios por unidad de servicio que deberá pagar cada uno de ellos. Además, el artículo 124 establece que a las personas de la tercera edad, los discapacitados y jubilados se les aplicará un subsidio en la tarifa de servicio doméstico, y que a las escuelas oficiales se les cobrará la cuota mínima cuando su consumo sea menor a 50 metros cúbicos por mes. El artículo 133 establece que las tarifas deben proporcionar la autosuficiencia financiera de la organización prestadora del servicio y que éstas deben ser aprobadas por el Congreso estatal (POEH, 1999: 3, 35 y 37).

• ISSN 2007-2422

Sobre las faltas cometidas por los usuarios, las sanciones respectivas y las atribuciones de prestador del servicio para aplicarlas, dice lo siguiente:

> "Artículo 140. La falta de pago en dos ocasiones consecutivas por parte de usuarios no domésticos faculta al prestador de los servicios a suspender los servicios públicos hasta que regularice su pago. En el caso de uso doméstico, la falta de pago en dos ocasiones consecutivas ocasionará la suspensión del servicio y de no regularizarse el mismo en el término de treinta días naturales, se procederá a la suspensión desde la red de distribución; (…) Artículo 145. Los prestadores de los servicios (…) podrán ordenar la práctica de visitas de inspección y verificación de los servicios por medio del personal autorizado; Artículo 146. Se practicará visitas para verificar: I. Que el uso de los servicios públicos sea el contratado; II. Que el funcionamiento de las instalaciones hidráulicas sea acorde a lo que se disponga en la autorización concedida; III. El funcionamiento de los medidores y las causas de alto o bajo consumo; IV. El diámetro exacto de las tomas y de las conexiones de las descargas; V. Que no existan tomas clandestinas o derivaciones no autorizadas; VI. La existencia de fugas de agua; (…) Artículo 164. Para los efectos de esta Ley cometen infracción: I. Las personas que estando obligadas no soliciten oportunamente el servicio de agua potable (…); II. Las personas que instalen u obtengan en forma clandestina el suministro de agua (…); III.- Los usuarios que causen o permitan desperfectos a un aparato medidor (…); IV. Los usuarios que por cualquier medio alteren el consumo marcado por los medidores o impidan la inspección o verificación de datos a los inspectores; V. El que por sí o por interpósita persona retire un medidor sin estar autorizado o varíe su colocación de manera transitoria o definitiva; (…) VIII. Los propietarios o poseedores de los predios frente a los cuales se localice alguna fuga que no haya sido reportada oportunamente al prestador del servicio; IX. Los que desperdicien el agua; (…) XII. Los que construyan u operen sistemas para la prestación de los servicios públicos, sin la concesión correspondiente; Artículo 165. Las infracciones a que se refiere el artículo anterior serán sancionadas administrativamente por los Organismos Operadores con multas que serán equivalentes a los siguientes días del salario mínimo general vigente en el área geográfica y en el momento en que se cometa la infracción: 1) 10 a 50, en el caso de violación a las fracciones I al V y VII al X; 2) 50 a 75, en el caso de violaciones a la fracción VI y XI; (…) Artículo 167. En los casos de las fracciones I, IV, VIII, IX y XII del artículo 164, así como en los casos de reincidencia, el Organismo Operador podrá imponer adicionalmente la suspensión temporal o definitiva del servicio". (POE, 1999).

Como se apuntó en el cuadro 4, la Junta de Gobierno del organismo operador de El Cardonal ha establecido dos categorías o tipos de usuario: doméstico y comercial. La Junta de Gobierno del organismo operador de San Salvador otras tres adicionales: pensionado, que se aplica a las tomas de agua entubada, cuyo titular tiene 60 o más años de edad; tandeo, que se aplica en aquellas tomas en donde el abasto de agua no es continuo y se hace cada determinado tiempo; toma muerta, que corresponde a usuarios que utilizan el servicio de manera esporádica.

Los dos organismos operadores que se estudiaron cumplen con la legislación estatal en el sentido de que la totalidad de tomas que abastecen tiene instalados aparatos para medir el consumo de agua. Pero, como se señala en el cuadro 5, el organismo operador de San Salvador no aplica las sanciones establecidas en la Ley de Agua y Alcantarillado del Estado de Hidalgo, y las categorías de usuarios determinadas para el organismo operador de El Cardonal no contemplan todas las opciones enumeradas en la misma ley.

Algunas de las causas del porqué el organismo operador de San Salvador no aplica las sanciones establecidas en la legislación son

las siguientes: existen tomas clandestinas; los usuarios no pagan las multas por fugas de agua o cuando se excede en el consumo; el usuario se opone cuando se le intenta suspender la toma de agua; los usuarios acuden de manera individual con el presidente municipal en turno para que intervenga y les condonen los pagos, o en caso extremo, los usuarios acuden en grupo y protestan frente a la presidencia municipal.

Además de lo anterior, el personal empleado sólo acude al domicilio a tomar la lectura del consumo de agua en los aparatos medidores, porque los usuarios no permiten las visitas de inspección y verificación que marca la ley.

De acuerdo con lo anterior, es posible afirmar que en los sistemas San Salvador y Santa María ni las tarifas ni los aparatos medidores cumplen la función de mecanismo para regular el consumo de agua, y que las sanciones no se aplican, pues los usuarios se oponen o interviene el presidente municipal, por lo cual en dichos sistemas no es posible excluir al usuario infractor o al que se demora en pagar el servicio de agua entubada, lo que contraviene lo expresado en el marco jurídico en la materia.

En el organismo operador El Cardonal, la situación es diferente. Su Junta de Gobierno estableció más sanciones que las indicadas en la Ley Estatal de Agua, las cuales están definidas en el contrato que se le expide a cada usuario y una de ellas incluye como pena máxima cancelar el contrato y desconectar la toma de agua en caso de no cubrir la tarifa por el consumo de agua durante dos meses consecutivos.

Así, en el sistema que maneja el organismo operador El Cardonal es posible excluir al usuario moroso, pero ni las tarifas ni los aparatos medidores cumplen con la función de regular el consumo de agua, toda vez que en siete de las ocho localidades que atiende el servicio se hace bajo el sistema de tandeo y se les suministra el agua cada tres días. Es decir, la Junta de Gobierno y el personal empleado han tomado la decisión de proporcionar el servicio cada tres días y es esta decisión, y no las tarifas ni los aparatos medidores, la que determina el volumen de consumo de agua en las tomas servidas.

Además de lo anterior, la Junta de Gobierno del organismo operador de El Cardonal no aplica la tarifa de pensionado ni la de toma muerta, aun cuando en las ocho localidades que abastece hay viviendas cuyo titular tiene 60 o más años de edad, y viviendas que sólo utilizan el servicio en determinadas épocas del año.

Entre las reglas de acceso a los sistemas San Salvador, Santa María y El Cardonal está el requisito de pedir por escrito la autorización del representante legal de la localidad donde se localiza el predio o vivienda a dotar de agua, los otros son solicitar el contrato respectivo ante el organismo operador en cuestión y comprar el material necesario para la instalación de la toma de agua.

Por tanto, una vez que se obtiene el acceso a los sistemas San Salvador o Santa María, la categoría de usuario se mantiene incluso cuando no se cubre el monto de la tarifa en tiempo y forma. Por el contrario, en el sistema El Cardonal se pierde tal categoría cuando se adeudan dos meses consecutivos de consumo de agua, y para obtener otra vez el servicio se debe solicitar un nuevo contrato y una nueva toma de agua.

Los ayuntamientos de El Arenal y Ajacuba han establecido tres categorías de usuarios para los sistemas que tienen a su cargo: doméstico, comercial e industrial. A las tres categorías o tipos de usuarios les han asignado una tarifa única y fija, que corresponde a $50.00 en los tres sistemas a cargo de la Dirección del Agua Potable de Ajacuba, y de $40.00 en los dos sistemas a cargo de la Dirección de Agua Potable de El Arenal.

Esto quiere decir que las tarifas se establecen de manera igualitaria para todas las tomas servidas por las dos direcciones municipales en cuestión. Pero en el cuadro 5 se indica que ambas organizaciones no ejecutan las sanciones enunciadas en la legislación estatal en la materia, porque los usuarios se oponen a ello. Así, existe igualdad en las tarifas, pero las dos organizaciones mencionadas carecen de legitimidad para cumplir con las reglas establecidas para mantener la categoría de usuario y no son capaces de excluir a los infractores.

• ISSN 2007-2422

Bajo tales circunstancias, los usuarios de los sistemas Tezontle, Tecomatlán, Veinte de Noviembre y Bocja-Chimilpa pagan la misma tarifa sin importar cuánta agua consuman y en qué la utilicen. En otras palabras, en los sistemas mencionados la tarifa tampoco sirve como mecanismo para regular el consumo del agua, como lo supone la Ley de Agua y Alcantarillado del Estado de Hidalgo, y de esa manera paga lo mismo el titular de una toma de tipo industrial que el titular de una toma de tipo doméstico.

La situación anterior es posible porque las tomas servidas por los cuatro sistemas mencionados carecen de aparatos medidores, y por esto último, las dos direcciones municipales incumplen con el mandato legal de que el servicio de agua potable debe ser medido. Valga decir que de los cinco sistemas manejados por direcciones municipales, sólo en el Ajacuba se han instalado aparatos medidores y los fontaneros realizan la lectura mensual del consumo de agua.

La falta de aparatos medidores, como indicaron los directores municipales del agua potable en las organizaciones respectivas, se debe a que los usuarios se oponen a su instalación y porque cuando se han instalado dichos aparatos los usuarios los quitan o dejan de pagar el consumo de agua.

Otra razón por la que ambas direcciones municipales incumplen del todo con la ley estatal es que no realizan las visitas de inspección y tampoco cancelan la toma del usuario infractor. Lo anterior se debe a que los usuarios no reconocen la autoridad del personal empleado por el ayuntamiento, y por tanto no le permiten el acceso a su domicilio y mucho menos desconectar la toma de agua de la red de distribución.

La oposición de los usuarios a la instalación de aparatos medidores y la incapacidad para inspeccionar el consumo de agua y las tomas servidas condujo al ayuntamiento de El Arenal a establecer el cobro de la tarifa única en los dos sistemas a su cargo; de esa manera, los usuarios más o menos han cumplido, pero persiste la morosidad en los pagos. En la entrevista no fue posible obtener el porcentaje de recaudación mensual, pero el director del agua potable mencionó que era muy bajo.

Cabe mencionar que el ayuntamiento de Ajacuba y el director municipal del agua potable permitieron a los usuarios participar en la toma de decisiones para establecer el monto de las tarifas que estaban vigentes al momento de las entrevistas, y como se documentó en trabajo de campo, tal negociación permitió un incremento de $10.00 en la tarifa mensual; además, se elevó de manera considerable el porcentaje en la recaudación mensual de los tres sistemas a cargo de dicha organización.

Si bien la consulta con los usuarios permitió que la Dirección Municipal de Agua Potable de Ajacuba incrementara el monto de la tarifa y el porcentaje de recaudación, las tomas servidas en los sistemas Tecomatlán y Tezontlale siguen sin ser inspeccionadas y sin aparatos para medir el consumo de agua, porque los usuarios así lo han decidido.

Sobre las reglas de acceso, el cuadro 5 indica que en las dos direcciones municipales se tiene como requisito solicitar la autorización del representante legal de la localidad donde se localiza el predio o vivienda a dotar de agua, y una vez que el posible usuario obtiene tal autorización, procede a solicitar el contrato que avala la prestación del servicio ante la Dirección de Agua Potable del municipio correspondiente. Por lo anterior, el ayuntamiento de El Arenal y el de Ajacuba también son flexibles al aplicar la legislación vigente, en el sentido de que permiten la participación de la autoridades comunitarias al momento de solicitar una toma de agua y, de hecho, la autorización del represente legal de la localidad es el primer requisito que se pide en ambas direcciones municipales antes de iniciar el trámite de contratar una toma de agua.

Finalmente, ni la dirección municipal de Ajacuba ni la dirección municipal de El Arenal excluyen a los usuarios morosos o infractores, aun cuando esa es una de las sanciones establecidas en los instrumentos que las rigen y las faculta para ello. Así, una vez que se obtiene el ingreso a los sistemas de agua entubada que manejan tales organizaciones, difícilmente se

ISSN 2007-2422

pierde la categoría de usuario, aun cuando no se cubra en tiempo y forma la tarifa mensual establecida, o se cometan las infracciones que marca la legislación estatal en la materia.

Conclusiones

De acuerdo con lo encontrado en campo, es posible afirmar que en los sistemas con autogobierno, los usuarios conforman estructuras administrativas y operativas de tipo horizontal, además de que en todos los casos analizados, el titular de una toma servida puede formar parte del comité de administración en turno o del personal operativo para las tareas de extracción y distribución del agua, o mantenimiento a la infraestructura.

Por el contrario, en sistemas gobernados por ayuntamientos o juntas de gobierno, se tiene una estructura administrativa y operativa de tipo vertical, en cuya toma de decisiones no participan los usuarios respectivos. Así, las tareas de operación y administración son organizadas y ejecutadas por una pequeña burocracia contratada a tiempo completo como personal de oficina en la presidencia municipal, o por una tecnocracia descentralizada del presupuesto municipal y dirigida por gerentes.

Por tanto, concluimos que en los sistemas de agua potable rurales, el tipo de gobierno influye de manera directa en la administración y operación, lo mismo que en la cantidad de personal contratado y la cadena de mando.

Sobre la elaboración de reglas, se puede afirmar de manera categórica, a la luz de los datos expuestos, que en los sistemas con autogobierno, los instrumentos que representan la categoría de usuario y la tarifa introducen principios de equidad y legitimidad. Situación que no sucede en los sistemas burocratizados, porque tales instrumentos carecen de legitimidad ante los usuarios, ya que no participan en el proceso de su elaboración ni en la implementación de los mismos.

Tenemos evidencias suficientes para sostener que el marco institucional emanado de la legislación vigente crea organizaciones inapropiadas para el manejo de sistemas de agua potable en pequeña escala. Así, el actual modelo de gestión con base en direcciones municipales u organismos operadores no resulta ser el más apropiado para todos los casos, ni el más legítimo, eficiente o equitativo.

Finalmente, para el caso específico del estado de Hidalgo, es posible asegurar que en algunos municipios, los usuarios prefieren el manejo autogestivo con base en conocimientos locales, que responden a particularidades de cada sistema de agua potable frente al arreglo institucional y organizacional que les ofrece la legislación vigente con base en gerentes.

Agradecimientos

Al personal de las direcciones municipales y organismos operadores, así como a los comités de usuarios, que dieron todas las facilidades para el trabajo de campo. Al financiamiento obtenido del proyecto *PROMEP-DSA/103,5/14/7114 Regadío y agricultura periurbana en Pachuca. Siglos XIX y XX*, para la redacción final de este artículo.

Referencias

Aguilar, E. (2011). *Gestión comunitaria de los servicios de agua y saneamiento: su posible aplicación en México*. México, DF: Naciones Unidas. Recuperado de http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/26079/S2011150_es.pdf?sequence=1 .

Ávila, P. (1996). *Escasez de agua en una región indígena de Michoacán: el caso de la Meseta Purépecha*. Guadalajara, México: El Colegio de Michoacán.

Ávila, P. (2002). Agua, poder y conflicto urbano en una ciudad media. En P. Ávila (Ed.) *Agua, cultura y sociedad en México* (pp. 271-292). México, DF: El Colegio de Michoacán, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Banco Mundial (2008). *Operadores locales de pequeña escala en América Latina. Su participación en la prestación de los servicios de agua y saneamiento.* Elaborado por el Programa de Agua y Saneamiento del Banco Mundial. Recuperado de http://www.wsp.org/sites/wsp.org/files/publications/OLPnomap.pdf.

Barkin, D. (2006). *La gestión del agua urbana en México. Retos, debates y bienestar*. México, DF: Universidad de Guadalajara.

Birrichaga, D. (2007). Modernización del sistema hidráulico rural en el estado de México 1935-1940. En D. Birrichaga (Coord.) *La modernización del sistema de agua potable en México 1810-1950* (pp. 193-217). Zinacantepec, México: El Colegio Mexiquense.

• ISSN 2007-2422

Bribiesca, J. L. (1958). El agua potable en la república mexicana. *Ingeniería hidráulica en* México, *12*(2), 69-82.

Burguete, A. (2000). *Agua que nace y muere. Sistemas normativos indígenas y disputas por el agua en Chamula y Zinacatán*. México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México.

Conagua (2004). *Ley de aguas nacionales y su reglamento*. México, DF: Comisión Nacional del Agua.

Conagua (2014). *Programa para la Sostenibilidad de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento en Comunidades Rurales*. México, DF: Comisión Nacional de Agua.

Fundación AVINA (22 de marzo de 2015). Organizaciones comunitarias dan agua segura a 70 millones de latinoamericanos y poco se sabe de ellas. *Noticias Fundación AVINA*. Recuperado de http://www.avina.net/esp/13010.

Galindo, E., & Palerm, J. (2007). Pequeños sistemas de agua potable: entre la autogestión y el manejo municipal en el estado de Hidalgo, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, *4*(2), 127-146.

Galindo, E., & Palerm, J. (2012). Toma de decisiones y situación financiera en pequeños sistemas de agua potable: dos casos en El Cardonal, Hidalgo, México. *Región y Sociedad*, *24*(54), 261-298.

García, A., & Vázquez, V. (2013). Mujeres, agua potable y organización comunitaria. Un estudio comparativo en la Sierra Mazateca de Oaxaca (pp. 421-439). En J. Palerm, & T. Martínez (Eds.). *Antología sobre riego: Instituciones para la gestión del agua, alegales e informales*. México, DF: Colegio de Postgraduados.

Gutiérrez, V., Nazar, D. A, Zapata, E., Contreras, J., & Salvatierra, B. (2013). Mujeres y organización social en la gestión del agua para consumo humano y uso doméstico en Berriozabal, Chiapas. *Revista LiminaR. Estudios sociales y humanísticos*, *11*(2), 100-113.

López, S., Martínez, T., & Palerm, J. (2013). Las comunidades en la administración de sistemas de agua potable. Región de los Volcanes, estado de México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, *10*(1), 39-58.

Martínez, M. (2002). *La gestión privada de un servicio público. El caso del agua en el Distrito Federal*. México, DF: Instituto Mora.

Ostrom, E. (2011). Prefacio (pp. 6-7). En P. Vagliente (Coord.). *Modelos de gobernabilidad democrática para el acceso al agua en América Latina*. Córdoba, Argentina: Fundación AVINA.

Palerm, J. (2014). Derecho humano al agua, derechos de agua, ordenamiento territorial, tecnología y administración (pp. 189-196). En R. López, J. L. Martínez, & E. López (Coords.). *Viabilidad y barreras para el ejercicio del derecho humano al agua y saneamiento en México*. México, DF: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Palerm, A. (1972). *Obras hidráulicas prehispánicas en el sistema lacustre del Valle de México*. México, DF: Secretaría de Educación Pública, Instituto Nacional de Antropología e Historia.

POEH (1999). *Ley Estatal de Agua Potable y Alcantarillado del estado de Hidalgo*. Pachuca, México: Periódico Oficial del Estado de Hidalgo.

Pimentel, J. L., Velázquez, M., & Palem, J. (2012). Capacidades locales y de gestión social para el abasto de agua doméstica en comunidades rurales del Valle de Zamora, Michoacán, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, *9*(2), 107-121.

Pineda, N. (1998). La municipalización de los sistemas de agua potable y alcantarillado. *Gaceta Mexicana de Administración Pública Estatal y Municipal*, 60, 91-97.

Pineda, N. (2002). La política urbana del agua potable en México: del centralismo y los subsidios la municipalización, la autosuficiencia y la privatización. *Región y Sociedad*, *14*(24), 41-69.

Pineda, N. (Coord.) (2006). *La búsqueda de la tarifa justa: el cobro de los servicios del agua potable y alcantarillado en México*. Hermosillo, México: El Colegio de Sonora.

Rodarte, R., Galindo, E., Díaz, F., & Fernández, G. (2012). *Gestión del agua y reconstrucción de la naturaleza en el Valle del Mezquital*. Pachuca, México: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Saldívar, A. (2007). *Las aguas de la ira: economía y cultura del agua en México, sustentabilidad o gratuidad*. México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México.

Sánchez, M. (21 de septiembre de 2015). ONG denuncia ataque a instalaciones de sistema de agua comunitario en Coyotepec, Edomex. *Sienembargo.mx. Periodismo digital con rigor*. Recuperado de http://www.sinembargo.mx/21-09-2015/1494049.

Sandoval, A. (2011). Entre el manejo comunitario y gubernamental del agua en la Ciénega de Chapala, Michoacán, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, *8*(3), 367-385.

Solís, L. (2005). *La escasez, el costo y el precio del agua en México*. México, DF: El Colegio Nacional.

Soto, G. (2007). *Agua: tarifas y escasez en las megaciudades*. México, DF: Universidad Iberoamericana.

Vargas, S. (julio, 2015). *Contradicciones entre la gestión social y la gestión municipal del agua*. En Asociación Mexicana de Ciencias Políticas, gobiernos locales, municipales, regionales y estatales. Simposio llevado a cabo en el III Congreso Internacional de Ciencias Políticas, Guadalajara, Jalisco, México.

Dirección institucional de los autores

Dr. Emmanuel Galindo Escamilla

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Sociales y Humanidades
Área Académica de Historia y Antropología
Carretera Actopan-Pachuca Km 4.5, San Cayetano
42084 Pachuca, Hidalgo, México
Teléfono: +52 (771) 7172 000, extensión 5226
emmanuel_galindo6175@uaeh.edu.mx

Dra. Jacinta Palerm Viqueira

Colegio de Postgraduados
Estudios del Desarrollo Rural
Carretera Federal México-Texcoco km. 36.5
56230 Montecillo, Texcoco, Estado de México, México
Teléfono: +52 (55) 58045 900, extensión 1876
jpalerm@gmail.com

Haga clic aquí para escribir al autor

• ISSN 2007-2422

Variabilidad de la huella hídrica del cultivo de cereales, río Cachapoal, Chile

• Vanessa Novoa* • Octavio Rojas • José Luis Arumí • Claudia Ulloa •
• Roberto Urrutia •
Universidad de Concepción, Chile
*Autor de correspondencia

• Anny Rudolph •
Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile

Resumen

Novoa, V., Rojas, O., Arumí, J. L., Ulloa, C., Urrutia, R., & Rudolph, A. (marzo-abril, 2016). Variabilidad de la huella hídrica del cultivo de cereales, río Cachapoal, Chile. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *7*(2), 35-50.

Se evaluaron los efectos de la variabilidad climática en el consumo de agua para la producción agrícola de cereales, a través del cálculo de la huella hídrica, metodología que consideró tres escenarios de precipitación: (a) año húmedo, (b) año normal y (c) año seco, y bajo dos condiciones de rendimiento (constante y disminución de 20%, proyectando el efecto de cambio climático), en tres secciones de la cuenca del río Cachapoal. Además, se calculó el agua virtual y la productividad aparente del agua para evidenciar el efecto de la variabilidad climática en la productividad del consumo del agua en el cultivo de cereales. El análisis de percentiles determinó que el año 2005 correspondió a húmedo, 2006 a normal y 2007 a seco. La huella hídrica de los cereales, bajo un rendimiento constante, fue mayor en el año húmedo con 1 064 m^3/ton; en cambio, con una disminución del rendimiento, fue mayor en el año seco (1 633.9 m^3/ton). Para ambas condiciones, la mayor huella hídrica azul se estimó en un año seco y la mayor huella hídrica verde en un año húmedo. Sin embargo, no se observaron diferencias entre las secciones de la cuenca. En un año húmedo se habría exportado la mayor cantidad de agua virtual con 14 325 000 m^3/año, y se habría producido la menor productividad aparente del agua, 92.8 $/$m^3$, información fundamental para determinar sistemas agrícolas sustentables.

Palabras clave: huella hídrica, precipitación, variabilidad climática, rendimiento.

Abstract

Novoa, V., Rojas, O., Arumí, J. L., Ulloa, C., Urrutia, R., & Rudolph, A. (March-April, 2016). Variability in the Water Footprint of Cereal Crops, Cachapoal River, Chile. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 7(2), 35-50.*

The water footprint was calculated to evaluate the effects of climate variability on the water consumed during the production of cereals. This methodology considered three precipitation scenarios: a) rainy year, b) normal year and c) dry year. It also included two yield conditions —constant and a 20% reduction (projecting for the effect of climate change)— for three sections of the Cachapoal River basin. In addition, virtual and apparent water productivity were calculated to demonstrate the effect of climate variability on water productivity of cereal crops. The analysis of percentiles found that the year 2005 corresponded to a rainy year, 2006 to a normal year and 2007 to a dry year. Under constant yield conditions, the water footprint of the cereals was larger during the rainy year (1 064 m3/ton), while under reduced yield conditions it was larger during the dry year (1 633.9 m3/ton). For both conditions, the largest blue water footprint estimated corresponded to a dry year and the largest green water footprint to a rainy year. Nevertheless, no differences among the sections of the basin were observed. During a rainy year, the largest amount of virtual water (14 325 000 m3/year) would be exported and the lowest apparent water productivity (92.8 $/m3) would be produced. This information is crucial to develop sustainable agricultural systems.

***Keywords**: Water footprint, precipitation, climate variability, yields.*

Recibido: 04/12/2014
Aceptado: 01/10/2015

Introducción

Uno de los principales desafíos de la sustentabilidad de los recursos hídricos en el mundo está relacionado con el aumento inexorable de la demanda de agua necesaria para satisfacer las crecientes necesidades de la población; se estima que en el orbe, un 70% del agua se destina para uso agrícola, un 22% para uso industrial y un 8% para uso doméstico (Strzepek & Boehlert, 2010; Konar *et al*., 2011). En países de ingresos medios y bajos, las extracciones de agua destinadas para uso agrícola ascienden a 82% (Pfister, Bayer, Koehler, & Hellweg, 2011; Mubako & Lant, 2013).

La evaluación de la disponibilidad del agua en una cuenca es un desafío complejo, ya que depende de las características geográficas del lugar, de su uso y el comportamiento del ciclo hidrológico afectado por procesos de variabilidad y cambio climático (Gleick, 2010). La agricultura depende de las condiciones climáticas, pues las fluctuaciones o variabilidades ejercen un significativo efecto en el rendimiento de los cultivos (Costanzo, Bonel, & Montico, 2009). Por lo tanto, la evaluación del uso del recurso agua durante el proceso de producción agrícola, considerando la variabilidad climática, contribuiría a incentivar una mejor gestión en las prácticas de manejo del agua en un área (FAO, 2011; Herath *et al*., 2013; Sun *et al*., 2013). En este contexto, la huella hídrica se ha propuesto como una herramienta que identifica el uso del agua y los efectos de la producción agrícola, proporcionando información para la toma de decisiones.

Esta metodología es capaz de distinguir las fuentes necesarias de agua para los cultivos, permitiendo la comparación entre siembras, en función de la productividad, eficiencia y vulnerabilidad de la disponibilidad del agua a escala local, nacional o global, considerando además la heterogeneidad existente entre países o áreas geográficas (Bulsink, Hoekstra, & Booij, 2010; Mekonnen & Hoekstra, 2011; Montesinos, Camacho, Campos, & Rodríguez-Díaz, 2011). Considera en su análisis variables como el tiempo de cultivo, eficiencia de riego y rendimiento en el nivel de cuenca hidrográfica, incluyendo las características de variabilidad climática regional a escala mensual (Hoekstra, 2014).

La huella hídrica identifica tres componentes: 1) huella hídrica verde, volumen de agua que se consume en el proceso de producción, como el agua que se encuentra como humedad del suelo en la zona no saturada, formada por la precipitación y disponible para las plantas; 2) huella hídrica azul, agua de riego, que comprende el volumen de agua superficial (ríos, lagos, humedales) o subterránea (acuíferos), que se consume en el proceso de producción; considera las salidas del sistema por evaporación de los cultivos; 3) huella hídrica gris, aquella que se requiere para asimilar los contaminantes generados durante el proceso de producción de cultivos (Hoekstra, 2013; Vanham & Bidoglio, 2013).

La agricultura convencional hasta ahora ha puesto énfasis en la gestión del agua de uso consuntivo (Mekonnen & Hoekstra, 2014). Sin embargo, la agricultura recibe tanto agua azul (de regadío), como agua verde (humedad del suelo), siendo necesario incluir todos los componentes del ciclo del agua (Willaarts, Volk, & Aguilera, 2012), además de los flujos hidrológicos, las salidas y los cambios de almacenamiento (Deurer, Green, Clothier, & Mowat, 2011), e indicar el impacto agrícola sobre los recursos hídricos (Ridoutt & Pfister, 2010).

Chile, en su larga extensión latitudinal (17° S y 56° S), presenta una gran diversidad de sistemas hidrográficos, con un amplio rango de variación en las precipitaciones, regímenes y periodos de caudales máximos (Oyarzún, Alvarez, Arumí, & Rivera, 2008). Estas condiciones climáticas determinan que un 45% del total de la producción agrícola nacional se realice entre los ríos Aconcagua (32° S) y Maule (35° S), ubicados en Chile central, siendo un núcleo de cultivo donde coexisten sistemas de riego y de secano. Se estima que entre los usos consuntivos, el riego representa 84.5% de uso del recurso en el ámbito nacional, con un caudal medio de 546 m^3/s, aplicados en unas dos millones de hectáreas (Gleick, 2010; Donoso, Blanco, Foster, Franco, & Lira, 2012).

• ISSN 2007-2422

A raíz del cambio climático global y sus proyecciones, entre los 30° S y 40° S (modelo HadCM3 escenario GEI A2) se evidencia una señal robusta de disminución de la precipitación de un 5 a 10% en una ventana temprana, y entre 20 y 30% en un escenario tardío (CEPAL, 2012). En los ríos de la zona central se ha observado un ascenso en la isoterma cero, registrando durante los últimos 100 años un claro retroceso glaciar (Carrasco, Casassa, & Quintana, 2005; Bown, Rivera, & Acuña, 2008), aspecto importante, considerando que la disponibilidad nival-glaciar contribuye con un 67% de la escorrentía superficial durante periodos secos asociados con La Niña (variabilidad climática) (Peña & Nazarala, 1987). De acuerdo con las tendencias presentadas, se estima que la oferta de agua disminuirá en un 40% al año 2016 (DGA, 2012; Pizarro *et al*., 2013), que se contrapone con un aumento estimado de la necesidad de riego en 4 mil millones de m^3 adicionales en los próximos 40 años (Neuenschwander, 2010).

En este estudio se evaluó la huella hídrica para la producción agrícola en la cuenca del río Cachapoal (34°), que cubre aproximadamente 161 500 ha, de las cuales 29 713 ha se destinan al cultivo de cereales, como maíz y leguminosas, lo que representa 73% de la producción nacional. En esta cuenca, el patrón de uso del agua está determinado por la superficie de riego: gravitacional por surco, microrriego por goteo y riego mecánico por aspersión tradicional (Censo Agrícola, 2007). En relación con la disponibilidad del agua en la cuenca, se informan áreas del secano interior y depresión intermedia con déficit hídrico o sequedad del suelo, y una correlación negativa entre estos índices y las precipitaciones, restringiendo el uso de riego (DGA, 2012; Sánchez & Carvacho, 2013).

Por ello, se evaluaron los efectos de la variabilidad climática en el consumo de agua para la producción agrícola, a través del cálculo de la huella hídrica, considerando tres escenarios de precipitación: (a) año húmedo, (b) año normal y (c) año seco, seleccionados a través de una data de 34 años de precipitaciones y bajo dos condiciones de rendimiento (normal y proyectando el efecto de cambio climático). La huella hídrica fue cuantificada por indicadores capaces de diferenciar entre las fuentes de agua verde y azul en las tres secciones de la cuenca del río Cachapoal. Además, se calculó el agua virtual y la productividad aparente, para determinar el efecto de la variabilidad climática en la productividad del consumo del agua en la producción de cereales.

Metodología

Área de estudio

La cuenca del río Cachapoal (34° S, 70° O) corresponde a una de las zonas agrícolas más productivas del centro-sur de Chile. Abarca un 38% de la superficie de la VI Región, con 6 370 km^2. La población de la cuenca asciende a 542 901 habitantes; 30% se desempeña en actividades relacionadas con la agricultura. Posee un clima templado con variaciones por efecto de la topografía, en que el ascenso del relieve genera modificaciones térmicas y pluviométricas. Sobre los 3 500 m, la rigurosidad climática se acentúa hasta alcanzar condiciones glaciales (MOP, 2013).

El análisis se realizó separando la cuenca del río Cachapoal en diferentes secciones, según sus variaciones altitudinales, por ejemplo, primera, segunda y tercera secciones (figura 1), además fue necesario emplear datos agrícolas, como superficie cultivada, rendimiento y técnicas de riego en las distintas secciones de la cuenca del Cachapoal (INE, 2007) (cuadro 1).

Determinación de la variabilidad climática

Los datos meteorológicos de entrada fueron seleccionados de nueve estaciones meteorológicas y pluviométricas que mantiene la Dirección General de Aguas (DGA) con una data de 34 años. Se trabajó para este estudio con la información de la estación más representativa en cada sección de la cuenca (cuadro 2). El estudio y corrección de la estadística pluviométrica mensual para cada sección se efectuó mediante el método de las curvas másicas.

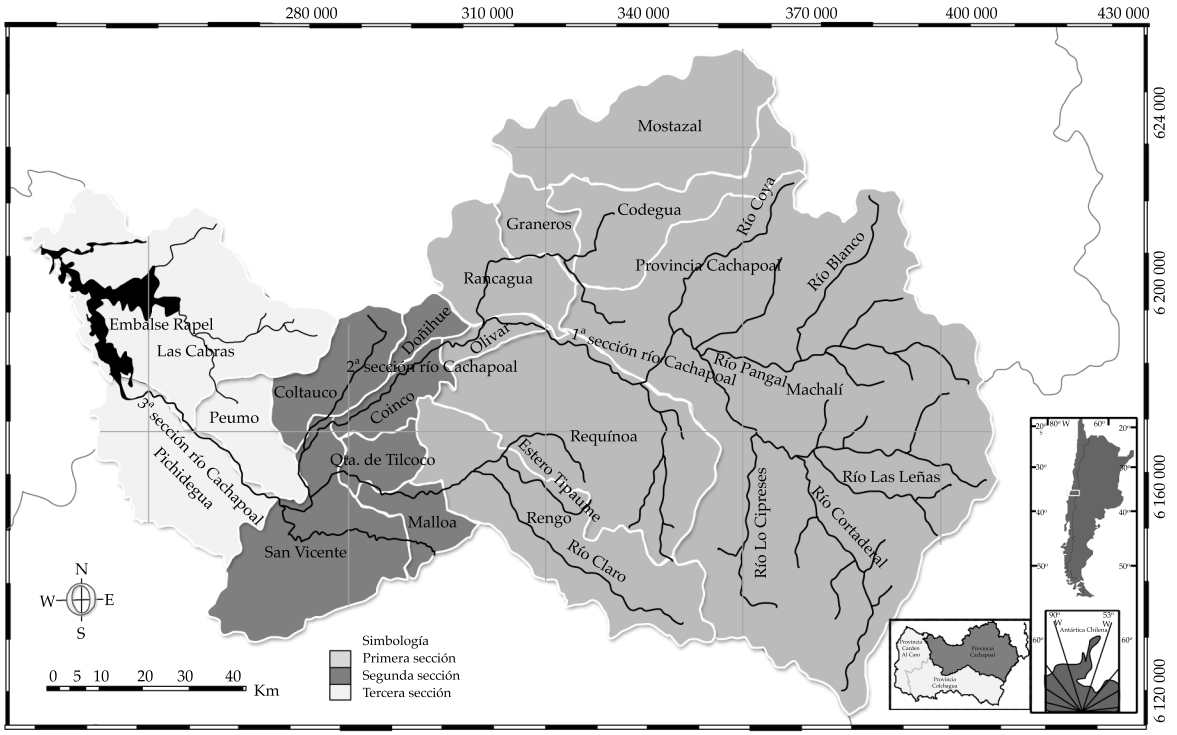


Figura 1. Cuenca del río Cachapoal. Se identificó para este estudio, de derecha a izquierda, con distintos tonos de gris, las secciones de su cuenca, por ejemplo, primera, segunda y tercera.

Cuadro 1. Localización de las estaciones meteorológicas en cada sección analizada, superficie sembrada, producción, rendimiento de cereales y técnicas de riego utilizadas por superficie regada en la cuenca del río Cachapoal. Fuente: Censo Agrícola 2007 (DGA, 2012).

Cuenca Cachapoal	Localización		Superficie cultivada (ha)	Producción total (qqm)	Rendimiento (ton/ha)	Superficie regada (%)		
						Riego gravitacional	Riego mecánico	Microrriego
1a sección	34° 45′ 31.01″ S	70° 45´ 24.65″ O	7 473.4	775 333	10.37	75.7	0.4	24
2a sección	34° 17′ 30.03″ S	71° 04´ 52.22″ O	12 263.8	1 518 158	12.38	82.6	0.8	16.7
3a sección	34° 17′ 29.29″ S	71° 24´ 24.18″ O	9 975.3	1 170 822	11.74	62.8	1.2	36.4

El análisis del comportamiento de las precipitaciones se realizó mediante boxplots, que entrega información sobre el comportamiento de ciclos estacionales y valores extremos en las observaciones (Guenni, Degryze, & Alvarado, 2008). La clasificación de años secos, normales y húmedos se realizó utilizando el método de los percentiles, que define cinco categorías: muy seco (percentil 0-20), seco (percentil 20-40), normal (percentil 40-60), húmedo (60-80) y muy húmedo (80-100) (Valiente, 2001).

Cálculo de la huella hídrica del cultivo de cereales (HH$_{cultivo}$)

La evaluación de la huella hídrica se realizó para cada una de las tres secciones de la cuenca, en condiciones climáticas de año húmedo, seco

• ISSN 2007-2422

Cuadro 2. Estación meteorológica, precipitación anual (Prec.), evapotranspiración de referencia (Et_o), precipitación efectiva (Prec. efec), evapotranspiración del cultivo de cereales (Et_c) y requerimiento de riego (Req de riego), en los años 2005, 2006 y 2007 en las distintas secciones del río Cachapoal.

Años	Sección	Estación representativa	Prec. (mm)	ETo (mm/día)	Prec. Efec (mm)	ETc (mm/dec)	Req riego (mm/dec)
2005	1a sección	La Rufina	1 405	2.84	715.7	398.0	246.2
	2a sección	Contaulco	822	2.81	546.7	395.6	264.0
	3a sección	Pichidegua	680	2.79	518.8	423.7	285.7
2006	1a sección	La Rufina	1 212	2.82	672.1	390.2	310.6
	2a sección	Contaulco	704	2.78	531.6	384.7	343.8
	3a sección	Pichidegua	597	2.67	464.7	384.7	315.8
2007	1a sección	La Rufina	488	2.68	400.0	401.7	395.4
	2a sección	Contaulco	318	2.73	279.9	396.7	396.6
	3a sección	Pichidegua	366	2.63	309.9	396.2	395.0

y normal, definidas según el análisis climático. Se trabajó bajo dos condiciones de rendimiento de cultivos: rendimiento constante de las secciones (1a, 2a y 3a) de 10.4, 12.4 y 11.7 ton/ha, respectivamente (Odepa, 2014), y para una disminución de un 20% en el rendimiento entre cada año, según lo proyectado en un escenario A2 de cambio climático para el cultivo de cereales (CEPAL, 2012).

Para el cálculo de la huella hídrica se empleó la metodología propuesta por Hoekstra, Chapagain, Aldaya y Mekonnen (2011), considerando la suma de sus componentes verde y azul (figura 2):

$$HH_{\text{cultivo}}\,(\text{m}^3/\text{ton}) = HH_{\text{verde}} + HH_{\text{azul}} \qquad (1)$$

Ambos componentes se determinaron a partir de las siguientes ecuaciones:

$$HH_{\text{verde}} = \frac{UAC_{\text{verde}}}{Y}\,(\text{m}^3/\text{ton}) \qquad (2)$$

$$HH_{\text{azul}} = \frac{UAC_{\text{azul}}}{Y}\,(\text{m}^3/\text{ton}) \qquad (3)$$

Donde Y (ton/ha) = rendimiento del cultivo (cuadro 1); UAC = uso de agua del cultivo verde y azul, según su fuente (precipitación o riego), expresada en m^3/ha (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998).

Cálculo de uso del agua del cultivo (UAC) (m^3/ha)

Se utilizaron las siguientes relaciones:

$$UAC_{\text{verde}} = 10 \times \sum_{d=1}^{lgp} ET_{\text{verde}}\,[\text{volumen/área}] \qquad (4)$$

$$UAC_{\text{azul}} = 10 \times \sum_{d=1}^{lgp} ET_{\text{azul}}\,[\text{volumen/área}] \qquad (5)$$

Donde Σ = ciclo de crecimiento del cultivo, es decir, desde la siembra (día 1) hasta la cosecha; *lgp* = longitud, días de cada etapa del ciclo; ET_c = evapotranspiración del cultivo (mm/día).

Estimación de evapotranspiración (verde y azul) del cultivo (ET_c)

Se determinó la demanda hídrica del cultivo de cereales, a partir del requerimiento de agua del cultivo (RAC), utilizando el *software Cropwat* 8.0. Bajo condiciones de crecimiento ideales, la ET_c se considera igual al RAC y correspondería al agua de evapotranspiración. El cálculo de ET_c se hizo en valores decadiarios (dec), en relación con la eficiencia de riego; esta metodología asume que las pérdidas por producto del riego permanecen y retornan a la cuenca:

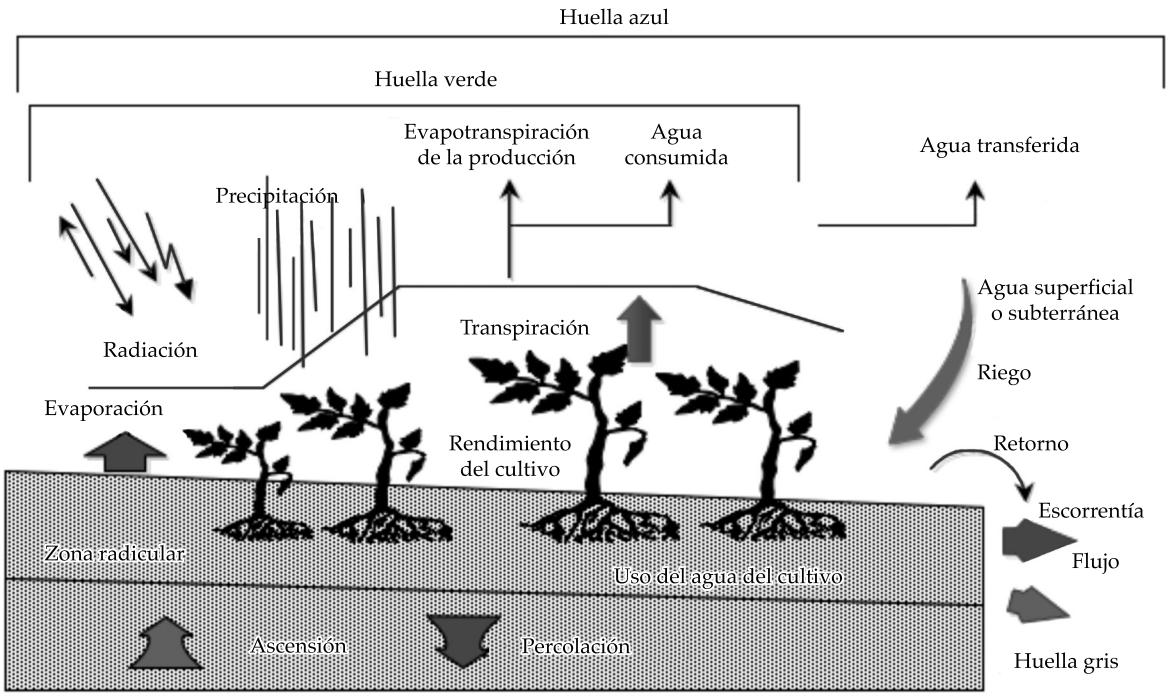


Figura 2. Esquema de los componentes de la huella hídrica agrícola.

$$ET_c\left[\text{mm/día}\right] = Kc * ET_o \quad (6)$$

$$ET_c\left[\text{mm/dec}\right] = ET_c\left[\text{mm/día}\right] * \text{días en cada década} \quad (7)$$

Donde Kc = coeficiente de cultivo; ET_o = evapotranspiración de referencia (mm día^{-1}).

La estimación de la ET_{verde} se realizó:

$$ET_{\text{verde}}\left[\text{mm/dec}\right] = ET_c\left[\text{mm/dec}\right] - \text{Req riego}\left[\text{mm/dec}\right] \quad (8)$$

Requerimiento de riego (Req de riego)

Donde:

$$\text{Req riego}\left[\text{mm/dec}\right] = ET_c\left[\text{mm/dec}\right] - \text{Peff}\left[\text{mm/dec}\right] \quad (9)$$

Precipitación efectiva (P_{eff}) calculada por el programa.

La estimación de ET_{azul} se hizo a partir de:

$$ET_{\text{azul}}\left[\text{mm/dec}\right] = \text{Req de riego}\left[\text{mm/dec}\right] \quad (10)$$

La suma de ambas, ET_{azul} (mm/dec) y ET_{verde} (mm/dec) es igual a ET_c (mm/dec).

Cálculo de la evapotranspiración (ET_O)

Se utilizó el método de Penman-Monteith y el programa *Cropwat* 8.0. Los datos climáticos, en función de la latitud y del periodo, fueron tomados de la DGA. La información fue georreferenciada usando el programa *Climwat* 2.0, donde:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta\left(R_n - G\right) + \gamma\frac{900}{T-273}u\left(e_s - e_a\right)}{\Delta + \gamma\left(1 + 0.34u\right)} \quad (11)$$

• ISSN 2007-2422

ET_o = evapotranspiración de referencia (mm día^{-1}); R_n = radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m^{-2} día^{-1}); R_a = radiación extraterrestre (mm día^{-1}); G = flujo de calor de suelo (MJ m^{-2} día^{-1}); T = temperatura media del aire (C°); u = velocidad del viento (ms^{-1}); e_s = presión de vapor de saturación (kPa); e_a = presión real de vapor (kPa); e_s-e_a = déficit de presión de vapor (KPa); Δ = pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C^{-1}); Γ = constante psicrométrica (kPa°C^{-1}).

*Cálculo del agua virtual (*AV*)*

Corresponde al volumen de agua contenida en un producto y que fue empleado en su producción, en un contexto de flujo de agua exportada (Hoekstra, 2014). Su cálculo se realizó a través de la ecuación descrita por Salmoral *et al*. (2011):

$$AV_{exp} = HH\left(\mathrm{m}^3/\mathrm{ton}\right) \times E \qquad (12)$$

Donde AV_{exp} = agua virtual exportado (m^3/año), E = cantidades de productos exportados (ton/año). La cantidad exportada (E) fue extraída del Informe Regional de Exportaciones Silvoagropecuarias (Odepa, 2013b).

*Productividad aparente del agua (*PAA*)*

Según Salmoral *et al.* (2011), corresponde al valor económico de la producción agraria por metro cúbico de agua utilizado. Se calculó a partir de:

$$PAA = \frac{\sum\left(Pr \times T_l\right)}{HH} \qquad (13)$$

Donde PAA = productividad aparente del agua ($/m^3) en Chile para los años analizados; Σ (Pr x T) = precio de mercado ($/ton) del producto agrícola; HH = huella hídrica del producto agrícola (m^3/ton). Los valores de la PAA en Chile para los años estudiados se tomaron del Informe Regional de Exportaciones Silvoagropecuarias (Odepa, 2013b).

Análisis estadístico

En la evaluación de la huella hídrica, el análisis de normalidad de los datos se hizo a través del test de Shapiro-Wilk. La factibilidad de utilizar un modelo aditivo se analizó aplicando el test de no aditividad de Tukey. Se realizó un análisis de varianza de dos vías para la comparación entre factores, por ejemplo, años (tres niveles, 2005, 2006, 2007) y secciones (tres niveles, 1°, 2°, 3°), y se aplicó la prueba *a posteriori* de Tukey. Para el análisis de los resultados del agua virtual y productividad aparente del agua se aplicó un análisis de la varianza de una vía. Se utilizó el programa computacional *Statistica* versión 6.0 (StatSoft Inc. 2001).

Resultados

Comportamiento climático de la cuenca del Cachapoal

La figura 3 muestra la variación espacial de la precipitación en la cuenca del Cachapoal para los 34 años analizados en las estaciones meteorológicas seleccionadas como referencia. La primera sección (sección cordillerana) fue la que presentó la mayor precipitación, con una media de 1.119 ± 409 mm (R^2 = 0.999; cv = 36.5), con un mínimo de 311 mm durante años muy secos y un máximo de 2.082 mm durante años muy húmedos. La segunda sección presentó una precipitación media de 649 ± 293 mm (R^2 = 0.997; cv = 45), mínimo de 117 mm y máximo de 1.517 mm. La tercera sección (con influencia costera) presentó las menores precipitaciones anuales, con 549 ± 230 mm (R^2 = 0.998; cv = 41), con mínimas de 145 mm y máximas de 1.022 mm. En el nivel intranual, la mayor variabilidad de los montos pluviométricos se registró durante el invierno.

Según el análisis de percentiles, las condiciones extremas fueron observadas en los años 2005 y 2007 (cuadro 2). El año 2005 fue característico de uno húmedo, con una precipitación media de 969 mm; mientras que 2007 representó una

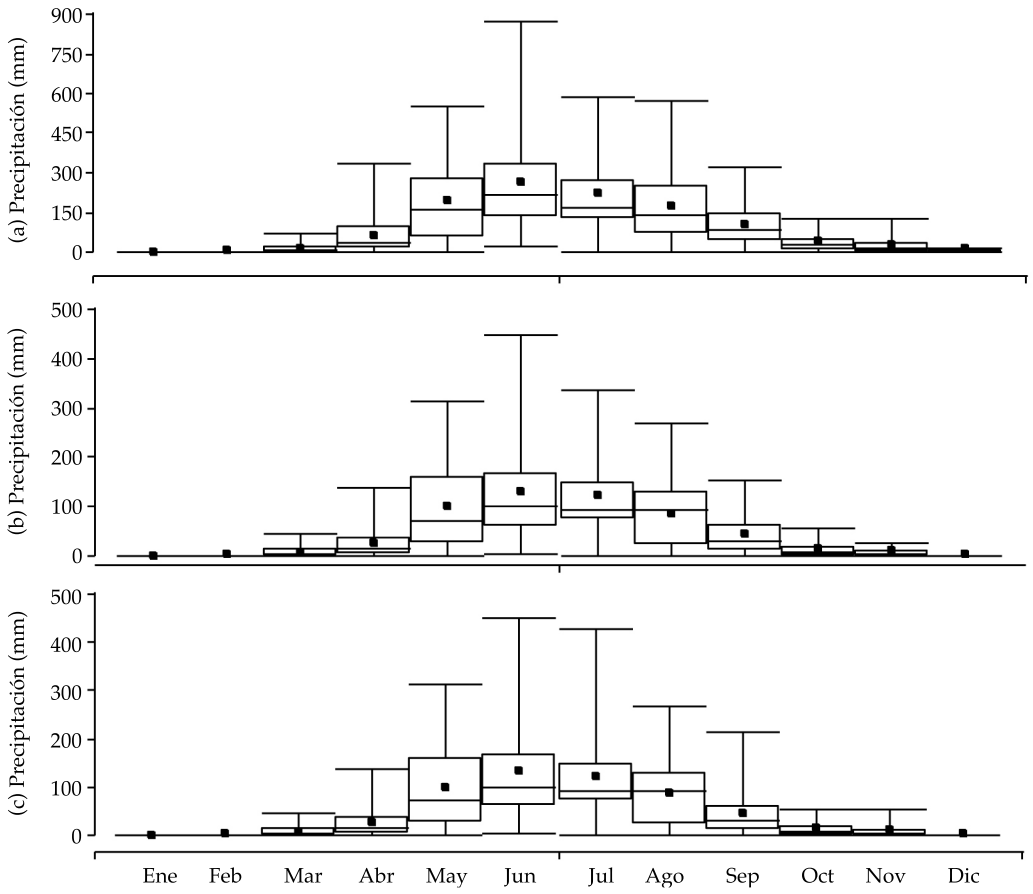


Figura 3. Boxplots de la precipitación mensual, para un periodo de 34 años en la cuenca del Cachapoal (mm): (a) primera sección, estación La Rufina; (b) segunda sección, estación Coltauco; (c) tercera sección, estación Pichidegua. La línea horizontal y el cuadrado dentro de la caja indican la mediana y la media. Los extremos inferior y superior de la caja corresponden a los cuantiles 0.25 y 0.75, respectivamente. Los bigotes inferior y superior, a los cuantiles 0.05 y 0.95, respectivamente.

condición seca, con 391 mm. Para una condición de pluviosidad normal se seleccionó 2006 (ver cuadro 2), con una precipitación media de 838 mm.

Huella hídrica del cultivo de cereales (HH$_{cultivo}$)

El cuadro 2 resume para cada sección de la cuenca del Cachapoal la información requerida para el cálculo de la huella hídrica. Se comprueba que para el año 2005 (año húmedo) fue mayor la ET_o, ET_c y la precipitación efectiva, y para el año 2007 (año seco) fue mayor el requerimiento de riego.

El ciclo de cultivo para el maíz se estimó en 125 días, con las siguientes etapas: inicial, 20 días; desarrollo, 35 días; madurez, 40 días; senescencia, 30 días. Tres valores de coeficiente de cultivo (*Kc*): 0.30, inicial; 1.20, en la etapa media; 0.35, final, para el periodo septiembre-diciembre (figura 4).

Se consideró para el análisis estadístico un modelo aditivo, pues no se encontró evidencia significativa ($P > 0.05$) al aplicar el test de no aditividad de Tukey. Además, no se halló evidencia en contra de la hipótesis de normalidad, cumpliendo así el supuesto de distribución normal ($P > 0.05$) de acuerdo con el test de Shapiro-Wilk (cuadro 4).

Como se observa en el cuadro 3, la huella hídrica total del cultivo de los cereales, bajo

Cuadro 3. Cálculo de evapotranspiración para el periodo de crecimiento (ET_c), uso del agua del cultivo (UAC) y huella hídrica (*HH*) para el cultivo de cereales en los años 2005, 2006 y 2007 en las distintas secciones del río Cachapoal, bajo condiciones de rendimiento constante (a) y el supuesto de una disminución de 20% en el rendimiento (b).

(*Y*)	Años	Sección	ET_c (mm/periodo de crecimiento)		UAC (m^3/ha)			Huella hídrica (m^3/ton)		
			Verde	Azul	Verde	Azul	Total	Verde	Azul	Total
Rendimiento constante (a)	2005	1a sección	151.8	246.2	1 518	2 462	3 980	146.4	237.4	383.8
		2a sección	131.6	264	1 316	2 640	3 956	106.4	213.4	319.8
		3a sección	138	285.7	1 380	2 857	4 237	117.6	243.4	361
		Total						370.3	694.3	1 064.6
	2006	1a sección	79.6	310.6	796	3 106.4	3 902.4	76.8	299.6	376.3
		2a sección	40.9	343.8	409	3 438	3 847	33.1	277.9	311
		3a sección	68.9	315.8	689	3 158	3 847	58.7	269.1	327.8
		Total						168.5	846.6	1 015.1
	2007	1a sección	6.3	395.4	63	3 954	4 017	6.1	380.19	386.3
		2a sección	0.1	396.6	1	3 966	3 967	0.1	320.5	320.5
		3a sección	1.2	395	12	3 950	3 962	1	337.6	338.6
		Total						7.2	1 038.3	1 045.4
Disminución del rendimiento (20%) (b)	2005	1a sección	151.8	246.2	1 518	2 462	3 980	146.4	237.4	383.8
		2a sección	131.6	264	1 316	2 640	3 956	106.4	213.4	319.8
		3a sección	138	285.7	1 380	2 857	4 237	117.6	243.4	361
		Total						370.3	694.3	1 064.6
	2006	1a sección	79.6	310.6	796	3 106.4	3 902.4	95.9	374.4	470.4
		2a sección	40.9	343.8	409	3 438	3 847	41.3	347.4	388.7
		3a sección	68.9	315.8	689	3 158	3 847	73.4	336.3	409.7
		Total						210.7	1 058.2	1 268.8
	2007	1a sección	6.3	395.4	63	3 954	4 017	9.5	595.8	605.3
		2a sección	0.1	396.6	1	3 966	3 967	0.1	501.1	501.2
		3a sección	1.2	395	12	3 950	3 962	1.6	525.8	527.4
		Total						11.2	1 622.7	1 633.9

el supuesto de un rendimiento constante, fue estimada en 1 064.6 m^3/ton para el año húmedo (2005); 1 015.1 m^3/ton para el año normal (2006), y 1 045.4 m^3/ton para el año seco (2007). Respecto de un año normal, el consumo en un año húmedo fue mayor en 49.5 m^3/ton y en un año seco sólo en 30.3 m^3/ton, observándose diferencias significativas entre los años analizados. Sin embargo, no se detectaron diferencias significativas en la huella hídrica total entre las secciones (1a, 2a y 3a) (ver cuadro 4).

La mayor huella hídrica azul se observó en 2007 (año seco), con 1 038.3 m^3/ton, correspondiente a agua de riego (cuadro 3). El test de Tukey mostró diferencias significativas entre un año húmedo, normal y seco; sin embargo, no percibió diferencias significativas entre las secciones (1a, 2a y 3a) (ver cuadro 4). La mayor huella hídrica verde se observó en 2005 (año húmedo) con 370.3 m^3/ton (ver cuadro 3). El análisis estadístico mostró diferencias significativas entre un año húmedo, normal y seco. Sin embargo, no mostró diferencias significativas entre las secciones (1a, 2a y 3a) (cuadro 4).

La tendencia observada entre las huellas hídricas azul y verde (ver cuadro 3), en un año húmedo, normal y seco, muestran que la

ISSN 2007-2422

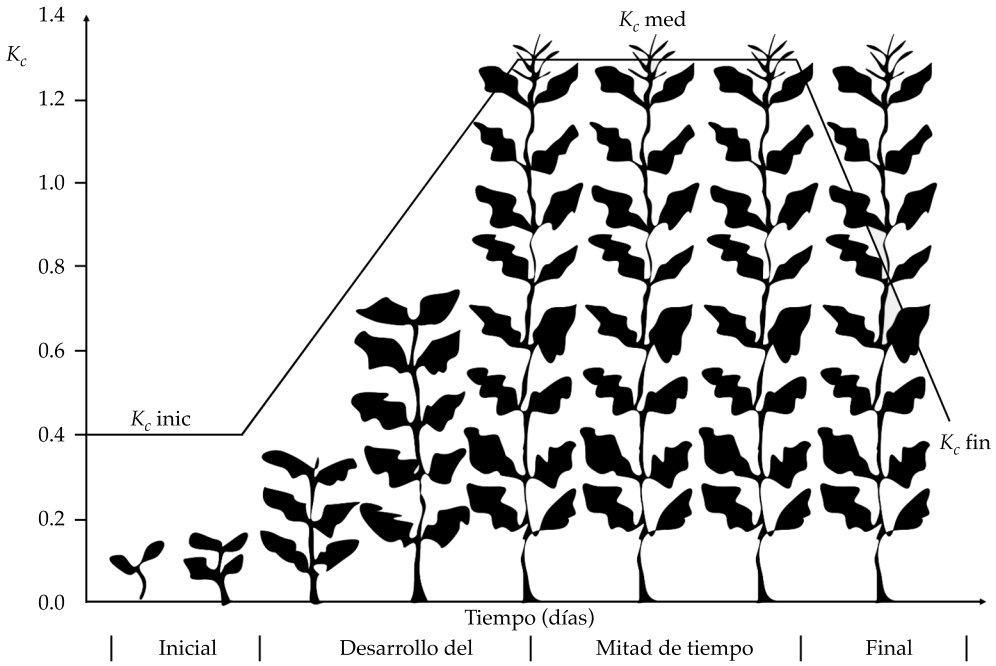


Figura 4. Etapas y coeficientes estimados para el cultivo (K_c) de maíz (periodo del 28 de septiembre al 30 de diciembre).

Cuadro 4. Resumen de los resultados obtenidos de la aplicación de análisis estadístico para los factores años y secciones en la evaluación de la huella hídrica para un rendimiento constante (a) y una disminución (20%) en el rendimiento (b).

			Huella verde		Huella azul		Huella total	
FV		*gl*	*F*	*p*-valor	*F*	*p*-valor	*F*	*p*-valor
Rendimiento constante (a)	Año	2	91.1473	0.0005	40.0632	0.0023	48.0072	0.0016
	Sección	2	5.5836	0.0696	3.8352	0.1175	3.0923	0.1543
	Test							
	No aditividad Tukey		0.1438		0.2196		0.1543	
	Shapiro-Wilk		0.9587		0.117		0.0764	
Disminución del rend. (20%) (b)	Año	2	72.6504	0.0007	123.1527	0.0003	127.1361	0.0002
	Sección	2	6.1044	0.0609	3.1464	0.151	24.5216	0.0057
	Test							
	No aditividad Tukey		0.2082		0.0697		0.1249	
	Shapiro-Wilk		0.5855		0.5243		0.7036	

huella azul incrementa (694.3-1 038.3 m^3/ton), mientras que la huella verde disminuye (370.3-7.2 m^3/ton).

La huella hídrica total, bajo la condición de una disminución de un 20% en el rendimiento de los cultivos, fue estimada en 1 064 m^3/ton para el año húmedo, 1 268.8 m^3/ton para un año normal y 1 633.9 m^3/ton para un año seco (ver cuadro 3). Respecto de un año normal, el consumo en un año seco fue mayor en 365.1

• ISSN 2007-2422

m^3/ton, no así en un año húmedo, en que el consumo fue menor en 204.2 m^3/ton, percibiéndose diferencias significativas entre los años analizados. Además, el análisis estadístico mostró diferencias significativas entre las secciones, donde la huella hídrica de la 1a sección fue mayor en los distintos años analizados (ver cuadro 4).

Bajo el supuesto de una disminución de un 20% del rendimiento de los cultivos (ver cuadro 3), la mayor huella hídrica azul se detectó también en un año seco, con 1 622.7 m^3/ton de agua de riego, distinguiéndose diferencias significativas entre el año húmedo, normal y seco. Sin embargo, las secciones de la cuenca no presentaron diferencias significativas. La mayor huella hídrica verde se observó también en el año húmedo con 370 m^3/ton, notando diferencias significativas entre un año húmedo, normal y seco. El análisis estadístico no mostró diferencias significativas entre las secciones (ver cuadros 4). Para esta condición, el incremento en la huella azul fue inverso a la huella verde; se advirtió una tendencia semejante en el supuesto anterior.

Agua virtual (AV)

En un año húmedo habría sido exportada la mayor cantidad de agua virtual total, con diferencias significativas respecto de un año seco (ANOVA $F_{(2,4)} = 6\ 293$; $P = 0.0001$). Esta mayor cantidad de agua virtual total correspondería al agua verde, proporcionada por las precipitaciones, con significativas diferencias entre los años analizados (ANOVA $F_{(2,4)} = 2\ 347$; $P = 0.0001$). En un año seco habría sido exportada la mayor cantidad de agua azul, que correspondería al agua agregada como riego, con diferencias significativas entre los años analizados (ANOVA $F_{(2,4)} = 3\ 215$; $P = 0.0001$) (figura 5).

Productividad aparente del agua (PAA)

La *PAA* en el periodo estudiado fluctuó en relación con los precios del mercado. La productividad aparente del agua en cuanto a la huella hídrica de cereales habría sido menor en un año húmedo (2005), calculado en 92.8 \$/m^3, y mayor en un año normal, 2006 (97.4 \$/m^3); observándose diferencias significativas

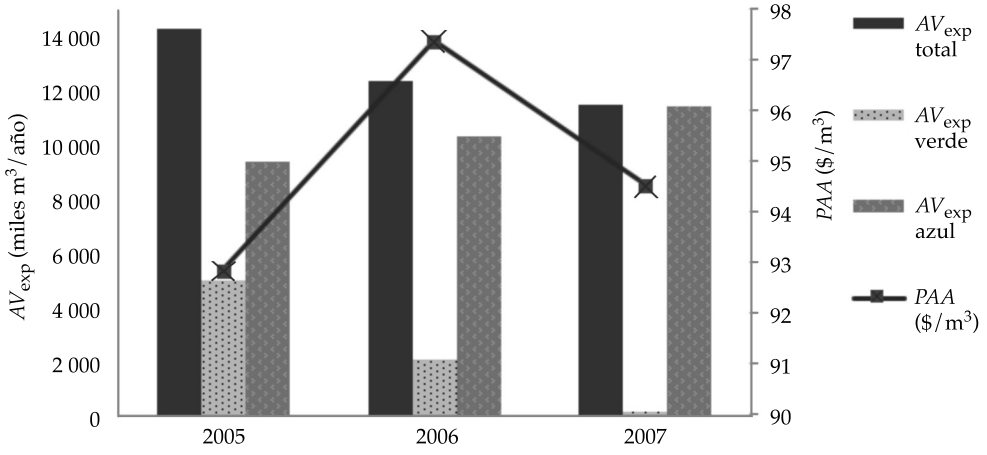


Figura 5. Estimación del contenido de agua virtual exportada (AV_{exp}) y productividad aparente del agua (*PAA*) en la producción de cereales, en un año húmedo (2005), normal (2006) y seco (2007), en la cuenca del río Cachapoal.

ISSN 2007-2422

entre los años estudiados 2005, 2006 y 2007 (94.5 $/m^3) (ANOVA $F_{(2,4)} = 39.02$; $P = 0.0004$) (ver figura 5).

Discusión

En una cuenca hidrográfica es primordial considerar que la agricultura es la actividad productiva y económica que presenta la mayor dependencia respecto de las condiciones climáticas locales, siendo ésta la primera responsable por la variación en la producción anual de los cultivos (Gil, Lozada, López, Marquez, & Salazar, 2012). Dentro de los elementos del clima, la precipitación es la principal causante de la alternancia periódica de los rendimientos; en condiciones de agricultura de secano y riego, como las observadas en la cuenca del río Cachapoal, su influencia es aún mayor.

El análisis de la data de 34 años de precipitaciones en el área demostró que la cuenca del río Cachapoal presenta una condición climática asimilable a un clima mediterráneo, con lluvias durante la estación fría (mayo-agosto) y un periodo seco durante la estación cálida (noviembre-febrero) (figura 3). Además de tener marcadas variaciones hídricas entre la primera sección, zona andina (con las más altas precipitaciones) y la tercera sección, con las menores precipitaciones (52% de disminución), correspondiente al sector en que el cauce drena la cordillera de la costa. Del mismo modo, permitió agrupar el comportamiento hídrico de la cuenca en años húmedos, normales y secos, que fluctuaron entre 117 y 1.517 mm. Esta región contribuye con un 73.2% a la producción chilena de cereales, lo que se atribuye a un conjunto de factores, entre los cuales destacan las condiciones de suelo (aluviales) y clima (Osorío, 2013).

Para evidenciar el efecto del clima sobre la huella hídrica de los cultivos, el supuesto de un rendimiento constante permitió observar que en condiciones climáticas extremas, como año húmedo y seco, la huella hídrica fue mayor 1 064 y 1 045 m^3/ton, respectivamente, en comparación con un año normal (1 015 m^3/ton) (ver cuadro 3). Los resultados de la variación entre año húmedo, normal y seco observados en este estudio fue similar a lo descrito por Rodríguez-Casado, Garrido, Llamas y Varela-Ortega (2008) para una cuenca española, en que la condición de año húmedo fue superior a la de un año normal.

Bajo el supuesto de una disminución de 20% en el rendimiento de los cultivos (situación proyectada ante un cambio climático), se observó que el uso del agua resulta menos productiva, ya que por tonelada de producto generado, el consumo de agua fue mayor (mayor huella hídrica) (cuadro 3), demostrando que la sostenibilidad de la huella hídrica en un cultivo de cereales debe considerar tanto la eficiencia del recurso agua como la situación climática.

Para ambos supuestos de rendimiento, por ejemplo constante, y una disminución de 20%, un año seco mostró una mayor huella hídrica azul (más aporte de riego); en cambio, en un año húmedo, se observó una mayor huella hídrica verde (mayor precipitación), indicando que la disponibilidad y fuente del agua son factores clave para la sustentabilidad. El agua para riego está influenciada por a) cambios en los regímenes hidrológicos (por ejemplo, variación en las precipitaciones, evaporación potencial y real, y/o escorrentía en la escala de cuenca); b) el aumento de la competencia entre los usuarios por el agua (Schmidhuber & Tubiello, 2007), y c) el periodo de siembra, crecimiento y métodos de cultivo (Xiong *et al*., 2010), estimado en este estudio en 120 días (figura 4).

En la agricultura, alrededor de 40% de las extracciones de agua retorna a los ríos y/o acuíferos locales, convirtiéndose en reutilizable, de modo que el cálculo del volumen de agua consumido proporciona una base sólida para estimar la extracción del recurso (Hoekstra, Mekonnen, Chapagain, Mathews, & Richter, 2012). De allí que la estimación del agua virtual es fundamental en periodos de sequía, pues permite estimar cómo la demanda de productos exportables puede afectar a los sistemas hidrológicos en las regiones exportadoras (Chen & Chen, 2013).

En este estudio se observó que la mayor cantidad de agua virtual total (AV_{exp}) habría

• ISSN 2007-2422

sido exportada en el año húmedo (2006) y la menor cantidad en un año seco (2007) debido al mínimo aporte de agua virtual verde; del mismo modo, en un año seco es mayor la cantidad de agua virtual azul exportada, lo que se compensa a través del riego. En particular, en 2007 (año seco), en la zona centro norte del país se registró una fuerte helada en la segunda semana de julio, que afectó a la cuenca del Cachapoal con un periodo de bajas temperaturas, que comprometió de modo grave la producción agrícola (Odepa, 2013a), situación que fue compensada con aumento de riego, lo que se refleja en este indicador (figura 5).

Se encontró que en valores de productividad aparente del agua (*PAA*) no evidencian el efecto de la condición climática, ya que para un año húmedo como 2005, el valor de *PAA* fue menor, a pesar de que la exportación de cereales comprometió un mayor contenido de agua virtual (figura 5). Donoso *et al*. (2012) plantean que en Chile los sectores económicos con mayor uso de agua, como es el caso de la agricultura, serían los que obtienen una menor *PAA*. Se estima en el ámbito nacional en 110 $/m^3 la productividad aparente del cultivo de cereales, valor similar a lo calculado en este análisis para la cuenca del río Cachapoal.

La mayor huella hídrica en el país en cuanto al sector agrícola se concentra en las regiones de O'Higgins hasta la Araucanía (Donoso *et al*., 2012). En estas regiones, el volumen de agua utilizada es de 6 676.74 millones de m^3/año, que corresponde a 70.2% del volumen de agua total utilizada en el sector agrícola (Hadjigeorgalis & Riquelme, 2002). Mejorar la eficiencia del uso del agua en Chile es un desafío debido a los bajos rendimientos agrícolas. Impulsado por la promulgación de la ley 18.450, la región de O'Higgins está incorporando métodos de riego con mayor tecnología en productos de exportación de alto valor. Se registra una modificación en los tipos de riego (gravitacional -41%; mecánico -8) y un aumento en el microrriego de 75%. Sin embargo, este esfuerzo no se ve reflejado en un menor consumo del recurso agua. Por lo tanto, la optimación de la productividad del recurso hídrico es un aspecto que debe ser considerado en el desarrollo de sistemas agrícolas sustentables (Postle, George, Upson, Hess, & Morris, 2012), pues el agua es el recurso que enlaza las actividades productivas y las variaciones de las condiciones ambientales. Un componente esencial para la atención de los retos de la seguridad hídrica es la generación de conocimiento y la innovación: "es indispensable un mejor conocimiento de los procesos naturales y sociales involucrados en la ocurrencia y gestión del agua, así como de los procesos antropogénicos involucrados" (Martínez-Austria, 2013). Asimismo, se requiere en Chile de mayor innovación tanto tecnológica como de metodologías de gestión del agua, creación de capacidades, organización social, marcos legales adecuados y desarrollo de instituciones, como la Superintendencia del Agua, propuesta por el actual gobierno, en el contexto de la Política Nacional para los Recursos Hídricos 2015.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a Conicyt por el financiamiento dado a través del proyecto CRHIAM Conicyt/Fondap/15130015 y al Programa de Capital Humano Avanzado Conicyt Gobierno de Chile, Beca de Doctorado Nacional-2011.

Referencias

Allen, R. G., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing CropWater Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, FAO, 300(9), 1-298.

Bown, F., Rivera, A., & Acuña, C. (2008). Recent Glacier Variations at the Aconcagua Basin, Central Chilean Andes. *Annals of Glaciology*, *48*, 40-48.

Bulsink, F. A., Hoekstra, Y., & Booij, M. J. (2010). The Water Footprint of Indonesian Provinces Related to the Consumption of Crop Products. *Hydrology and Earth System Sciences*, *14*, 119-128.

Carrasco, J. F., Casassa, G., & Quintana, J. (2005). Changes of the 0 °C Isotherm and the Equilibrium Line Altitude in Central Chile during the Last Quarter of the 20th Century. *Hydrological Sciences Journal*, *50*(6), 933-948.

CEPAL (2012). *La economía del cambio climático en Chile*. Santiago: Naciones Unidas, 367. Recuperado de http://

repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/35372/S2012058_es.pdf?sequence=1.

Chen, Z. M., & Chen, G. Q. (2013). Virtual Water Accounting for the Globalized World Economy: National Water Footprint and International Virtual Water Trade. *Ecological Indicators*, *28*, 142-149.

Costanzo, M., Bonel, B., & Montico, S. (2009). Efecto de la variabilidad climática sobre la producción de bioenergía a partir de maíz (*Zea mays*, L.). *Revista de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias*, *15*. Recuperado de http://www.cienciasagronomicas.unr.edu.ar/revista/articulos/RIFCA-2009_a9(15)053-061.pdf.

Deurer, M., Green, S. R., Clothier, B. E., & Mowat, A. (2011). Can Product Water Footprints Indicate the Hydrological Impact of Primary Production? A Case Study of New Zealand Kiwifruit. *Journal of Hydrology*, *408*, 246-256.

DGA (2012). *Información pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y aguas subterráneas*. División de Hidrología. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Chile, 384, 32. Recuperado de http://www.dga.cl/productosyservicios/informacionhidrologica/Informacin%20Mensual/boletin012012.pdf.

Donoso, G., Blanco, E., Foster, W., Franco, G., & Lira, J. (2012). *Seguridad hídrica y alimentaria en América Latina y España: el caso de Chile*. Pontificia Universidad Católica, 463. Recuperado de http://www.researchgate.net/profile/Javier_Lira/publication/236589704_Report_2012_Water_and_Food_Security_in_Chile/links/0deec5181e6485b23f000000.pdf.

FAO (2011). *Climate Change, Water and Food Security*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Land and Water Development Division. Recuperado de http://www.fao.org/3/a-i2096e.pdf.

Gil, J. A., Lozada, B. I., López, N., Marquez, L., & Salazar, G. (2012). Climatic Variability and Changes Evidences at Maturín, Monagas State, Venezuela. *Revista Científica UDO Agrícola*, *12*(2), 389-399.

Gleick, P. H. (2010). Climate Change and the Integrity of Science. *Science*, *328*, 689-690.

Guenni, L., Degryze, E., & Alvarado, K. (2008). Análisis de la tendencia y la estacionalidad de la precipitación mensual en Venezuela. *Revista Colombiana de Estadística*, *31*(1), 41-65.

Hadjigeorgalis, E., & Riquelme, C. (2002). Análisis de los precios de los derechos de aprovechamiento de aguas en el río Cachapoal. *Ciencia e Investigación Agraria*, *29*, 91-100.

Herath, I., Green, S., Singh, R., Horne, D., Van der Zijpp, S., & Clothier, B. (2013). Water Foot Printing of Agricultural Products: A Hydrological Assessment for the Water Footprint of New Zealand's Wines. *Journal of Cleaner Production*, *41*, 232-243.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual*. London: Earthscan. Recuperado de http://waterfootprint.org/media/downloads/TheWaterFootprintAssessmentManual_2.pdf

Hoekstra, A. Y., Mekonnen, M. M., Chapagain, A. K., Mathews, R. E., & Richter, B. D. (2012). Global Monthly Water Scarcity: Blue Water Footprints *versus* Blue Water Availability. *PLoS ONE*, *7*(2), e32688.

Hoekstra, A. Y. (2013). *The Water Footprint of Modern Consumer Society*. London: Routledge, Soft and Hardcover.

Hoekstra, A. Y. (2014). Water Scarcity Challenges to Business. *Nature Climate Change*, *4*(5), 318-320.

INE (2007). *Censo agropecuario y forestal*. Instituto Nacional de Estadísticas Chile. Recuperado de http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/censos_agropecuarios/censos_agropecuarios.php.

Konar, M., Dalin, C., Suweis, S., Hanasaki, N., Rinaldo, A., & Rodriguez-Iturbe, A. I. (2011). Water for Food: The Global Virtual Water Trade Network. *Water Resources Research*, *47*, 1029-10307.

Martínez-Austria, P. (2013). Los retos de la seguridad hídrica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *4*(5), 165-180.

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The Green, Blue and Grey Water Footprint of Crops and Derived Crop Products. *Hydrology and Earth System Science*, *15*, 1577-1600.

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2014). Water Footprint Benchmarks for Crop Production: A First Global Assessment. *Ecological Indicators*, *46*, 214-223.

Montesinos, P., Camacho, E., Campos, B., & Rodríguez-Díaz, J. A. (2011). Analysis of Virtual Irrigation Water. Application to Water Resources Management in a Mediterranean River Basin. *Water Resources Management*, *25*, 1635-1651.

MOP (2013). *Estrategia nacional de recursos hídricos 2012-2025. Resumen ejecutivo* (Pp. 1-40). Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas. Recuperado de http://www.mop.cl/Documents/ENRH_2013_OK.pdf.

Mubako, S. T., & Lant, C. L. (2013). Agricultural Virtual Water Trade and Water Footprint of U.S. States. *Association of American Geographers*, *103*, 385-396.

Neuenschwander, A. (2010). *El cambio climático en el sector silvoagropecuario de Chile* (126 pp.). Santiago: Fundación para la Innovación Agraria FIA.

Odepa (2013a). *Cambio climático, impacto en la agricultura, heladas y sequía*. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. Recuperado de http://www.odepa.cl/wp-content/files_mf/1388169148cambioClimatico.pdf.

Odepa (2013b). *Evolución de las exportaciones silvoagropecuarias de Chile, 2003-junio 2013*. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. Recuperado de http://www.odepa.cl/wp-content/files_mf/1386811080evolucionExportaciones.pdf.

Odepa (2014). *Maíz: producción, precios y comercio exterior*. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. Recuperado de http://www.odepa.cl/wp-content/files_mf/1416319649Boletíndelmaíz201411.pdf.

Osorío, A (Ed.) (2013). *Determinación de la huella del agua estrategias de manejo de recursos hídricos* (211 pp.). Serie Actas núm. 50. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional De Investigación Intihuasi.

Oyarzún, R., Alvarez, P., Arumí, J., & Rivera, D. (2008). Water Use in the Chilean Agriculture: Current Situation and Areas for Research Development. In F. Columbus (Chief Editor). *Agricultural Water Management Research Trends*. New York: Nova Science Publishers, Inc. Hauppauge, NY 11788.

Peña, H., & Nazarala, B. (1987). *Snowmelt-Runoff Simulation Model of a Central Chile Andean Basin with Relevant Orographic Effects* (pp. 161-172). IAHS Publ. 166. Symposium at Vancouver 1987 - Large Scale Effects of Seasonal Snow Cover.

Pfister, S., Bayer, P., Koehler, A., & Hellweg, S. (2011). Projected Water Consumption in Future Global Agriculture: Scenarios and Related Impacts. *Science of the Total Environment*, *409*, 4206-4216.

Pizarro, R., Garcia-Chevesich, P., Valdes, R., Dominguez, F., Hossain, F., Ffolliott, P., Olivares, C., Morales, C., Balocchi, F., & Bro, P. (2013). Inland Water Bodies in Chile Can Locally Increase Rainfall Intensity. *Journal of Hydrology*, *481*, 56-63.

Postle, M., George, C., Upson, S., Hess, T., & Morris, J. (2012). *Assessment of the Efficiency of the Water Footprinting Approach and of the Agricultural Products and Foodstuff Labelling and Certification Schemes, Report for the European Commission* (pp. 457). Cranfied, UK: DG Environment.

Ridoutt, B. G., & Pfister, S. (2010). A Revised Approach to Water Footprinting to Make Transparent the Impacts of Consumption and Production on Global Freshwater Scarcity. *Global Environmental Change Human and Policy Dimensions*, *20*, 113-120.

Rodríguez-Casado, A., Garrido, M., Llamas, R., & Varela-Ortega, C. (2008). La huella hidrológica de la agricultura española. *Papeles de Agua Virtual*, 2,5-37.

Salmoral, G., Dumont, A., Aldaya, M., Rodríguez-Casado, R., Garrido, A., & Llamas R. (2011). *Análisis de la huella hídrica extendida de la cuenca del Guadalquivir*. Fundación Botín. *Observatorio del Agua*, *91*, *1*, 11-85.

Sánchez, M., & Carvacho, L. (2013). Aproximación a la determinación del déficit hídrico en la Región del Libertador General Bernardo O´Higgins, Chile, a partir de imágenes MODIS y datos meteorológicos. *Revista de Geografía Norte Grande*, *55*, 109-124.

Schmidhuber, J., & Tubiello, F. (2007). Global Food Security under Climate Change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *104*, 19703-19708.

StatSoft Inc. (2001). *Statistica (data analysis software system)*. Recuperado de www.statsoft.com.

Strzepek, K., & Boehlert, B. (2010). Competition for Water for the Food System. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, *365*, 2927-2940.

Sun, S., Wu, P., Wang, Y., Zhao, X., Liu, J., & Zhang, X. (2013). The Impacts of Interannual Climate Variability and Agricultural inputs on Water Footprint of Crop Production in an Irrigation District of China. *Science of the Total Environment*, *444*, 498-507.

Valiente, O. (2001). Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas*, *26*, 59-80.

Vanham, D., & Bidoglio, G. (2013). A Review on the Indicator Water Footprint for the EU28. *Ecological Indicators*, *26*, 61-75.

Willaarts, B. A., Volk, M., & Aguilera, P. A. (2012). Assessing the Ecosystem Services Supplied by Freshwater Flows in Mediterranean Agro Ecosystems. *Agricultural Water Management*, *105*, 21-31.

Xiong, W., Holman, I., Lin, E. D., Conway, D., Jiang, J. H., Xu, Y. L., & Li, Y. (2010). Climate Change, Water Availability and Future Cereal Production in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *135*, 58-69.

Dirección institucional de los autores

M.C. Vanessa Novoa

Docente
Universidad de Concepción
Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía
Departamento de Geografía
Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile
Teléfono: +56 (99) 9512 976
vanessa.novoa@gmail.com

Dr. Octavio Rojas

Docente-investigador
Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Ambientales EULA-Chile
Departamento de Planificación Territorial
Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile
Teléfono: +56 (97) 3485 067
ocrojas@udec.cl

Dr. José Luis Arumí

Universidad de Concepción
Facultad de Ingeniería Agrícola
Departamento de Recursos Hídricos
Centro CRHIAM Conicyt/Fondap-15130015
Vicente Méndez 595, Chillán, Chile
Teléfono: +56 (42) 2208 804
jarumi@udec.cl

Dra. Claudia Ulloa

Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Ambientales, Centro EULA
Departamento Ingeniería Ambiental
Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile
Teléfono: +56 (41) 2204 066
claudiaulloa@udec.cl

Dr. Roberto Urrutia

Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Ambientales, Centro EULA
Departamento Sistemas Acuáticos
Víctor Lamas 1290, Concepción, Chile
Teléfono: +56 (41) 2204 054
rurrutia@udec.cl

M.C. Anny Rudolph

Universidad Católica de la Santísima Concepción
Facultad de Ciencias
Departamento Química Ambiental
Alonso de Ribera 2850, Concepción, Chile
Teléfono: +56 (99) 1650 724
annyr@ucsc.cl

Haga clic aquí para escribir al autor

• ISSN 2007-2422

Agua virtual en un marco insumo-producto para la cuenca del valle de México

• Lilia Rodríguez-Tapia* • Jorge A. Morales-Novelo •
• Fabiola S. Sosa-Rodríguez •
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, México
*Autor de correspondencia

• Juan Carlos Altamirano-Cabrera •
World Resources Institute, USA

• Francisco Torres-Ayala •
Cátedra Conacyt-Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, México

Resumen

Rodríguez-Tapia, L., Morales-Novelo, J. A., Sosa-Rodríguez, F. S., Altamirano-Cabrera, J. C., & Torres-Ayala, F. (marzo-abril, 2016). Agua virtual en un marco insumo-producto para la cuenca del valle de México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *7*(2), 51-66.

La cuenca del valle de México (CVM) se ubica en la región central de México, genera la cuarta parte de la producción total nacional y registra la mayor sobreexplotación de sus acuíferos en el país. Este artículo introduce la metodología para estimar los multiplicadores de agua virtual (MAV) de cada actividad económica de la cuenca a partir de la matriz insumo-producto de la cuenca del valle de México 2008. Los MAV contabilizan el agua virtual involucrada en las actividades económicas dentro de la región, con el resto de la economía de México y el mundo. Los resultados identifican las actividades económicas de baja y alta intensidad en el uso del agua que predominan en la cuenca. Asimismo, haciendo el balance entre exportaciones e importaciones de agua virtual en la CVM, se concluye que se importan bienes con alto contenido de agua y se exportan bienes con bajo contenido del recurso. Dicho comportamiento describe a la cuenca como una región importadora neta de agua virtual, lo cual es una característica positiva que ayuda a compensar el estrés hídrico que sufre la cuenca. Este hallazgo parece confirmar el teorema de Heckscher-Ohlin del comercio internacional, sugiriendo la racionalidad económica de una región que enfrenta el mayor estrés hídrico del país.

Palabras clave: comercio de agua virtual, cuenca del valle de México, insumo-producto en la CVM, modelo insumo-producto, multiplicador de agua virtual.

Abstract

Rodríguez-Tapia, L., Morales-Novelo, J. A., Sosa-Rodríguez, F. S., Altamirano-Cabrera, J. C., & Torres-Ayala, F. (March-April, 2016). Virtual Water in an Input-Output Framework for the Valley of Mexico Basin. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 7(2), 51-66.*

The Valley of Mexico basin (VMB) is located in central Mexico and produces one-fourth of the total national production. The overexploitation of its aquifers has been registered as the highest nationwide. This article introduces a methodology to estimate virtual water multipliers (VWM) for the economic activity in the basin based on an input-output matrix for the VMB for 2008. The VWM takes into account the virtual water related to the economic activities of a region, with the rest of the economy of Mexico and the world. The results identified the economic activities with low- and high-intensity water usage that are prevalent in the basin. In addition, based on the balance between virtual water imports and exports in the basin, it is concluded that goods with high water contents are imported and goods with low water contents are exported. This behavior describes the basin as a net importer of virtual water, which is a positive characteristic that helps to compensate for the water stress in the basin. This finding appears to confirm the Heckscher-Ohlin theorem of international trade, suggesting the economic rational of a region which is experiencing the highest water stress nationwide.

Keywords: *Virtual water trade, Valley of Mexico basin, input-output in the Valley of Mexico basin, input-output model, virtual water multipliers.*

Recibido: 02/12/2014
Aceptado: 14/10/2015

Introducción

La cuenca del valle de México (CVM) es la región económica más importante del país y al mismo tiempo enfrenta la mayor sobreexplotación de sus recursos hídricos. Así, la escasez del agua afecta el bienestar de diversos grupos de la población y representa una restricción para el crecimiento económico. En este contexto, para tener un mejor diagnóstico de cómo reducir la tensión hídrica en la CVM, nos interesa investigar la estructura del consumo del agua virtual y la eficiencia en el uso del recurso hídrico por las actividades económicas.

El plan del artículo considera cinco apartados. Primero, en la introducción, se describen las características económicas e hídricas de la CVM, lo cual evidencia las complejas relaciones que existen entre una oferta limitada de este recurso *versus* la elevada demanda de agua. Asimismo, se introduce el concepto de "agua virtual". En la segunda sección se describe la metodología para estimar el agua virtual. En la tercera sección se aplica dicha metodología para la CVM, y se estiman los coeficientes hídricos directos y los multiplicadores de agua virtual, así como las demandas finales de agua para todos los sectores. En la cuarta sección se discuten los resultados, se analiza la estructura del comercio exterior de agua virtual de la CVM y cómo ésta puede ayudar a atenuar el estrés hídrico de la misma; por último, se presentan las conclusiones.

Características económicas e hídricas de la cuenca del valle de México (CVM)

La CVM abarca una superficie total de 9 738 km^2, que cubre parte de tres entidades federativas, Estado de México, Hidalgo, Tlaxcala (está conformada por 85 municipios), y las 16 delegaciones del Distrito Federal (hoy Ciudad de México). La naturaleza topográfica de la CVM se caracteriza por una configuración endorreica, cóncava en su forma y rodeada por una cadena montañosa sin salidas naturales, lo cual ha requerido de grandes obras de infraestructura para expulsar el agua pluvial y residual de la CVM (estas obras iniciaron con la construcción del Tajo de Nochistongo en el siglo XVIII), así como para traer agua de otras cuencas (Lerma y Cutzamala).

Los asentamientos poblacionales en la CVM (20.59 millones de habitantes) se concentran en un área de 7 854 km^2 (Conagua, 2009), denominada Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), la cual concentra 97% de la población de la cuenca, lo que determina que su perfil sea de tipo urbano (INEGI, 2010). Este asentamiento es el más grande del país y compite con los más grandes del mundo.

Con base en la estadística denominada matriz insumo-producto de la cuenca del valle de México 2008 (MIP-CVM-2008), hemos estimado que el valor bruto de la producción generado en la cuenca es de 5.085 billones de pesos (millones de millones de pesos), y representa la cuarta parte de la producción del país, lo cual muestra la relevancia de la actividad económica de la región en el crecimiento económico de México. Son tres sectores los que contribuyen mayormente a la producción en la CVM. El sector *servicios* contribuye con casi la mitad de valor bruto de la producción (48.6%), le siguen las *industrias manufactureras*, con casi una quinta parte de la producción (19.2%), y después el *comercio* con 14.5%. La *agricultura y producción primaria* sólo explica 1.5% de la producción. Esta estructura es acorde con el perfil urbano de los asentamientos en la CVM.

Estrés hídrico en la CVM

Para el año 2008, la importante actividad económica desarrollada en la CVM y el consumo de sus más de 20 millones de población demandaron en conjunto un volumen de agua de 2 902.29 hectómetros cúbicos (hm^3/año) (Conagua, 2009). El 43% de este volumen se destinó al uso público urbano y 57% para las actividades económicas (Rodríguez & Morales, 2013). Por otra parte, las fuentes de abastecimiento de agua en la CVM son el agua de la misma CVM, que explica casi tres cuartas partes del total (73%); el agua importada, que constituye casi una quinta

• ISSN 2007-2422

parte (21%), y el agua de reúso, que aporta alrededor de 6% del suministro total (Conagua, 2009, 2010).

El problema es que en la CVM se utiliza, en promedio anual, un volumen de agua dos veces mayor al que garantiza un uso sustentable de la misma. La magnitud razonable de uso del agua en una cuenca lo delimita la magnitud conocida como disponibilidad natural media (DNM). La DNM de la cuenca se ha estimado en 1 404.68 hm^3, volumen que se obtiene de la suma del escurrimiento superficial virgen medio y la recarga subterránea anual; ambas magnitudes denotan volúmenes de agua que se renuevan cada año y subrayan la condición del vital líquido como un recurso natural renovable; mientras que el requerimiento total de agua para la CVM es de 2 902.29 hm^3, que representa dos veces la DNM. Aplicando el conocido índice de Falkenmark para medir el estrés hídrico, se tiene que la CVM califica en escasez extrema, al alcanzar una DNM del agua per cápita anual de 68.2 m^3/hab/año, mucho menor que los 1 000 m^3/hab/año que se define en dicha categoría.

La fuente proveedora más importante de agua para la CVM es la misma cuenca. Para ser más precisos, de acuerdo con datos de Conagua (2009, 2010), 90% proviene de acuíferos (subterránea) y el 10% restante se explica por el agua superficial. En efecto, el agua subterránea es la principal fuente de suministro en la cuenca. En 2008 se extrajeron 1 903.8 hm^3/año (Conagua 2009, 2010), cifra que representa 2.1 veces la recarga natural del acuífero. La extracción rebasa en 1 010.35 hm^3/año la recarga natural, por ende, se presenta una sobreexplotación de esta fuente en una magnitud de 113%. Este desbalance alcanza la clasificación de uso predatorio de los recursos hídricos subterráneos con importantes impactos colaterales, como la subsidencia de importantes áreas urbanas, así como una disminución en la calidad del agua y el aumento del costo de extracción.

El concepto de agua virtual

El concepto de "agua virtual" ha sido introducido por Allan (1997, 1999) y se refiere a la cantidad de *agua utilizada* para producir un determinado producto o servicio. El adjetivo "virtual" se refiere al hecho de que sólo parte del agua usada para producir el producto se contiene en el mismo, y muchas veces esta parte puede ser insignificante respecto al contenido de agua virtual (Hoekstra & Chapagain, 2008). Por ejemplo, se ha estimado que para la elaboración de una taza de café se requieren 114 litros (l) de agua o para obtener un kilogramo de arroz se necesitan de 1 a 4 metros cúbicos (m^3) de agua (Chapagain & Hoekstra, 2004). En efecto, es posible estimar la cantidad de agua requerida en el proceso de producción de cualquier bien o servicio. En este sentido, el concepto *agua utilizada* no sólo se refiere al contenido físico de agua en un producto, sino que además incluye toda el agua que ha sido consumida durante el proceso de producción de ese producto en particular, así como el agua usada en los procesos de producción de sus insumos.

El concepto de agua virtual es particularmente relevante en su conexión con el comercio (Lenzen & Foran, 2001). Por ejemplo, una región o país puede ahorrar agua reemplazando alguno de los productos domésticos intensivos en el uso de agua por bienes importados de regiones con relativa abundancia en el recurso. Así pues, a partir del concepto de agua virtual es posible medir la cantidad de agua involucrada en las exportaciones e importaciones de bienes y servicios, lo que nos remite a la teoría de Heckscher-Ohlin aplicada al recurso hídrico, la cual establece que los países con relativa abundancia de agua exportan bienes y servicios producidos con relativa intensidad en el uso de la misma (Debaere, 2014). El agua virtual contenida en las exportaciones e importaciones también juega un importante papel en la determinación de la huella hídrica (Chapagain & Hoekstra, 2004). Por ejemplo, la huella de agua de una nación indica el volumen total de agua utilizada en el consumo de bienes y servicios por los habitantes del país. Dichos habitantes consumen productos importados y por lo tanto agua virtual externa, mientras que al mismo tiempo agua doméstica es usada en la producción de productos exportados que son consumidos en el exterior.

ISSN 2007-2422

El trabajo de Debaere (2014) muestra que el agua es de hecho una fuente de ventaja comparativa y que los países con más agua disponible per cápita tienden a exportar más bienes intensivos en agua. Los resultados muestran que la proporción mundial de las exportaciones de países con abundancia de agua tiende a aumentar con la intensidad de agua de los bienes que exportan. A continuación ofrecemos la metodología y estimación de las exportaciones e importaciones de agua virtual.

Metodología

El enfoque de agua virtual busca estimar el consumo (productivo) directo e indirecto de agua; el método consiste en contabilizar el agua directamente usada en la producción de un bien o servicio, así como la que se requiere para la producción de sus insumos. El concepto de agua virtual estima la cantidad de agua utilizada de forma directa e indirecta en la producción de un bien o servicio a partir de la matriz insumo-producto (MIP).

El análisis insumo-producto es una herramienta adecuada para determinar el agua virtual contenida en una unidad monetaria de demanda final en una rama o actividad específica, lo que se conoce como multiplicador de agua virtual (MAV). Esto es, el MAV registra la cantidad de agua directamente utilizada en el proceso de producción de la unidad de demanda final de la rama *i*, más el agua requerida para producir la cantidad del bien *k* que es usado como insumo en el proceso de *i*, más el agua consumida para producir los insumos *n* que se utilizan en la producción de *k*, etcétera. Sumando todos los requerimientos directos e indirectos de agua se obtiene la cantidad total de agua incluida en la unidad de demanda final de la rama *i*, lo que se conoce como MAV. En síntesis, el multiplicador del agua virtual (MAV) se define como la cantidad de agua que se requiere directa e indirectamente para producir una unidad de demanda final en una actividad económica específica.

La idea de utilizar el concepto de agua virtual en una estructura insumo-producto responde a que en vista de las relaciones directas e indirectas que se establecen entre sectores puede rastrearse el destino del agua de acuerdo con los componentes de la demanda final (uso doméstico o bien algún sector externo). Esta perspectiva permite determinar el comercio de agua directa e indirectamente implicado en, por ejemplo, los bienes y servicios exportados.

Estimación de multiplicadores del agua virtual

El trabajo aquí desarrollado se centra en el destino del agua utilizada en la CVM después de que ésta ha sido incorporada en la producción de bienes y servicios. Usando un esquema insumo-producto, se calcula cuánta agua debe ser atribuida a la demanda final, distinguiendo entre destino doméstico (CVM), resto de México y resto del mundo. Esto permite determinar el comercio del agua que está directa e indirectamente contenida en, por ejemplo, la exportación de bienes y servicios.

La metodología se basa en la matriz insumo-producto de la cuenca del valle de México, 2008 (MIP-CVM, 2008), base estadística que permite conocer la estructura económica de la región y que registra la actividad que capta y suministra agua. Los datos de los flujos del agua de la CVM para 2008 se obtuvieron de la Conagua (2009) para su consistencia con la matriz MIP-CVM-2008. Las mediciones de transacciones de agua entre sectores resultan más complicadas, por lo que en esta investigación se recurrió a la información de la base de datos del modelo hídrico de la CVM (UAM, 2010) y a la aplicación de ajustes dentro de grandes agregados.

A partir de la MIP-CVM-2008 se estima la matriz inversa de Leontief, la cual da cuenta de la interdependencia entre las diversas actividades presentes en la región, y permite captar los impactos directos e indirectos que significa el uso de un insumo básico de la producción, como es el agua. En específico, en este trabajo se estiman los MAV para las actividades económicas presentes en la CVM, los que son utilizados para estimar el agua virtual involucrada en el

• ISSN 2007-2422

comercio con el resto de la economía de México y el mundo. Lo anterior permite analizar los efectos que tiene el comercio sobre la preservación de los recursos hídricos en un área donde existe déficit de agua. La metodología aplicada para el cálculo de los MAV se basa en el trabajo de Dietzenbacher y Velázquez (2007).

Así pues, la manera de considerar los efectos indirectos en el uso del agua usando el esquema de la MIP se explica a continuación. Una MIP se integra con las submatrices que se indican en la figura 1.

Los elementos z_{ij} son los flujos interactividades que definen una matriz Z de dimensión n x n, en donde n indica el número de actividades económicas de la CVM. Esto es, z_{ij} denota las entregas de la actividad i a la actividad j en la misma cuenca (i, j van de 1,…n).

Los elementos f_{ij} de la matriz F de tamaño n x k denotan las entregas del sector i en la CVM a las diferentes categorías que conforman la demanda final j (donde $j = 1,…k$). Las categorías de la demanda final son consumo privado, consumo de gobierno, exportaciones al resto de la economía mexicana, exportaciones al resto del mundo, formación bruta de capital y variación de existencias.

El vector v' (renglón) contiene el valor agregado (comprende sueldos y salarios, depreciación, excedente de operación, impuestos indirectos menos subsidios) de cada actividad. La suma de este vector da el valor agregado en la CVM, que es el Producto Regional Bruto (PRB), análogo a lo que se conoce como Producto Interno Bruto (PIB).

Los elementos típicos m_{ij} del vector M (renglón) denotan la importación que se origina en el sector externo j (resto de la economía mexicana o el resto del mundo) y que son comprados por los sectores i de la CVM (son los insumos importados).

Los elementos x_i del vector columna X denotan el producto bruto en la actividad i en la CVM. El valor del producto en cada actividad se puede obtener sumando sobre los renglones o sobre las columnas de la matriz. Sumando sobre las columnas se produce la siguiente ecuación:

$$x_i = \sum_j z_{ij} + \sum_j f_{ij}$$

en donde $z_{ij} = a_{ij}x_j$ y f_{ij} es la demanda final.

Los coeficientes de insumos directos se definen como $a_{ij} = z_{ij}/x_j$, e indican los insumos (adicionales) en unidades monetarias (pesos) del sector i que se requieren para la producción de un peso adicional de producto en el sector j en la CVM. Cuando se utiliza esta definición y sumando las categorías de la demanda final (p. ej., $f_i = \sum_j f_{ij}$), implica que la ecuación contable del producto sectorial puede rescribirse como:

$$x_i = \sum_j a_{ij}x_j + f_i$$

o en notación matricial:

$$x = Ax + f$$

Si la matriz A de coeficientes de insumos directos se conoce y se supone constante, es posible estimar la producción de los diversos

Z	F	x
v'		
M		
x'		

Figura 1. Matriz insumo-producto.

ISSN 2007-2422

sectores para cualquier vector dado de demanda final ($\tilde{f}$) (p. ej., exógenamente especificado). La solución produce:

$$(1-A)^{-1}\tilde{f} = L\tilde{f} = x$$

donde $L = (1 - A)^{-1}$ denota la inversa de Leontief o *matriz de multiplicadores*. Tomando $\tilde{f} = 0, \ldots 0,1, \ldots)'$, por ejemplo, el j_{simo} elemento unitario de la demanda final ofrece la interpretación de los elementos de la inversa de Leontief. Cada elemento l_{ij} de la inversa de Leontief proporciona el producto (extra) en el sector i que es necesario para generar un peso (extra) de demanda final en el sector j. Esos elementos de L toman en cuenta todos los efectos directos e indirectos requeridos para la producción de una unidad de demanda final. Tomando la suma de columnas de la inversa de Leontief se obtienen los llamados multiplicadores del producto. Esto es, $\sum_i l_{ij}$ indica el producto total (extra) que deberá producirse por un peso más de demanda final en el sector j.

Multiplicando en forma correspondiente los elementos l_{ij} (columna de la inversa de Leontief) por los coeficientes de insumos directos de agua y_j (vector transpuesto) (p. ej., $y_j l_{ij}$) se obtiene cuántos litros (extra) de agua son directa e indirectamente consumidos por el sector i para generar una unidad monetaria adicional de demanda final en el sector j. Sumando los resultados del vector sobre i se obtiene la cantidad extra de agua virtual para producir un peso adicional de demanda final en el sector j o su multiplicador de agua virtual (MAV). Los multiplicadores de agua virtual para las actividades económicas o sectores de la CVM se registran en la cuarta columna del cuadro 1 (p. ej., $\sum_i y_j l_{ij}$) y se logra un multiplicador por actividad económica.

Resultados

Coeficientes hídricos directos y multiplicadores de agua virtual

Esta sección describe la forma en que las actividades económicas de la CVM utilizan el agua. La información se registra en el cuadro 1 construido a partir de la matriz de la cuenca MIP-CVM-2008 y de datos de Conagua para el año 2008. La información se denota con la nomenclatura de las matrices insumo-producto.

i: actividades económicas por fila.
j: actividades económicas por columna.
w_j: vector fila de consumo directo de agua (agua de primer uso) por actividad económica.
x_j: vector fila de producción por actividad económica.
$y_j = w_j / x_j$: vector de coeficientes directos de agua; define el consumo de agua en litros por unidad monetaria de producción.
l_{ij}: multiplicadores de producción de la MIP de la columna j.
$\sum_i y_j l_{ij}$: multiplicadores de agua virtual por actividad económica (MAV).

La primera columna del cuadro 1 registra el consumo de agua de primer uso por actividad

Cuadro 1. Coeficientes directos del agua y multiplicador de agua virtual por actividad económica de la cuenca del valle de México, 2008.

Actividades J	**(1) Uso del agua millones de m³ (hm³)**		**(2) VBP millones de pesos ($)**		**(3) Coeficientes directos litros/peso (l/$)**	**(4) Multiplicador de agua virtual MIP-CVM litros/peso (l/$)**
	w_j	%	x_j	%	$y_j = (w_j/x_j)$	MAV = $\sum_j [y_j * l_{ij}]$
Agricultura y otras actividades primarias (a)	145.25	9.35	58 034	1.14	2.50	3.67
Ganadería	218.22	14.04	19 581	0.39	11.14	11.44

• ISSN 2007-2422

Cuadro 1 (continuación). Coeficientes directos del agua y multiplicador de agua virtual por actividad económica de la cuenca del valle de México, 2008.

Actividades J	(1) Uso del agua millones de m^3 (hm^3)		(2) VBP millones de pesos ($)		(3) Coeficientes directos litros/peso (l/$)	(4) Multiplicador de agua virtual MIP-CVM litros/peso (l/$)
	w_j	%	x_j	%	$y_j = (w_j/x_j)$	MAV = $\sum_j[y_j{}^*l_{ij}]$
Total de agricultura y otras actividades primarias	**363.47**	**23.39**	**77 615**	**1.53**	**-**	**-**
Promedio	**-**	**-**	**-**	**-**	**4.68**	**7.68**
Total de generación y suministro de electricidad, agua y gas	**1.49**	**0.10**	**19 689**	**0.39**	**0.08**	**0.22**
Total de construcción	**30.26**	**1.95**	**380 663**	**7.49**	**0.08**	**0.09**
Industria alimentaria	36.88	2.37	221 606	4.36	0.17	0.99
Industria de bebidas y tabaco	20.68	1.33	54 918	1.08	0.38	0.65
Fabricación de insumos textiles	2.77	0.18	18 427	0.36	0.15	1.05
Confección de productos textiles	0.86	0.06	6 970	0.14	0.12	0.25
Fabricación de prendas de vestir	4.62	0.30	38 617	0.76	0.12	0.24
Fabricación de productos de cuero y piel	0.67	0.04	3 747	0.07	0.18	0.44
Industria de madera	0.18	0.01	6 249	0.12	0.03	0.07
Industria del papel	9.91	0.64	37 394	0.74	0.27	0.39
Impresión e industrias conexas	4.73	0.30	20 096	0.40	0.24	0.34
Otras industrias	46.46	2.99	569 206	11.19	0.08	0.16
Total de industrias manufactureras	**127.77**	**8.22**	**977 229**	**19.22**	**-**	**-**
Promedio	**-**	**-**	**-**	**-**	**0.13**	**0.23**
Total de comercio	**4.27**	**0.27**	**735 024**	**14.45**	**0.01**	**0.07**
Total de transporte, correo y almacenamiento	**217.90**	**14.02**	**424 896**	**8.36**	**0.51**	**0.71**
Industria fílmica, de video y sonido	44.17	2.84	33 097	0.65	1.33	1.44
Residencias de asistencia social y salud	1.36	0.09	578	0.01	2.35	2.40
Otros servicios de asistencia social	1.83	0.12	648	0.01	2.83	2.90
Servicios de entretenimiento en instalaciones recreativas y otros servicios recreativos	24.92	1.60	9 407	0.18	2.65	2.77
Servicios de alojamiento temporal	32.92	2.12	16 489	0.32	2.00	2.06
Servicios de preparación de alimentos y bebidas	44.03	2.83	52 622	1.03	0.84	0.89
Asociaciones y organizaciones	62.86	4.05	39 049	0.77	1.61	1.69
Otros servicios	597	38.39	2 318 415	45.59	0.26	0.44
Total de servicios	**808.60**	**52.04**	**2 470 305**	**48.58**	**-**	**-**
Promedio	**-**	**-**	**-**	**-**	**0.33**	**0.55**
Total de 80 actividades	**1 554**	**100**	**5 085 421**	**100**	**-**	**-**
Promedio	**-**	**-**	**-**	**-**	**0.31**	**0.48**

(a) Incluye actividades agropecuarias, forestales, de pesca y minería
Fuente: elaboración propia a partir de la MIP-CVM, 2008.

ISSN 2007-2422

económica (w_j) en hm^3; en la correspondiente columna de porcentajes se anota la participación de cada actividad dentro del total de agua de primer uso en la cuenca; se observa que las actividades agrupadas bajo el concepto de servicios registran la mayor participación (52.04%), seguido de las actividades agrícolas y ganaderas (23.39%); después las actividades de transporte, correo y almacenamiento (14.02%), manufacturas (8.22%), construcción (1.95%) y, en último lugar, el comercio (0.27%).

La segunda columna indica el valor bruto de la producción (VBP) de cada actividad (x_j) y su correspondiente participación en el valor bruto de la producción de la cuenca. Se identifica que las actividades agrícolas y ganaderas, no obstante que registren una muy baja participación en la producción (1.53%), explican casi (23.29%) una cuarta parte del agua utilizada en forma directa en toda la cuenca. El comercio se comporta a la inversa, sólo ocupa 0.27% de agua de primer uso y produce 14.45% del valor de la producción de la cuenca. Las actividades agrupadas como servicios explican la mitad del VBP y la mitad del agua utilizada directamente. Las actividades manufactureras explican una quinta parte del VBP y usan 8.22% del agua de primer uso. Estos dos últimos grupos incluyen actividades económicas, con altas variaciones en el uso del agua y en la participación en la generación del producto, dependiendo de las condiciones particulares de producción de cada actividad.

La tercera columna registra el vector de coeficientes directos de agua (y_j) e indica la cantidad de litros de agua de primer uso que requiere cada actividad económica para producir un peso de su correspondiente valor bruto de producción. El valor de y_j para toda la cuenca es de 0.31 litros, lo cual indica que para producir un peso de valor bruto de la producción se requieren incorporar directamente 310 mililitros (ml) de agua (o lo que es lo mismo, 310 litros de agua por cada mil pesos de VBP). Los requerimientos directos de agua de las diversas actividades económicas son muy variados, por ejemplo, para producir un peso de valor bruto de producción en la actividad agrícola se requieren 2.5 litros y para ganadería 11.14 litros, valores que se ubican muy arriba del promedio de la economía y que las califica como actividades intensivas en el uso del agua. Las actividades agrupadas dentro del rubro de los servicios registran requerimientos directos de agua muy diversos —su media, que es 0.33 litros, se ubica ligeramente arriba de la media de cuenca—. Destacan los casos de las siguientes actividades: otros servicios de asistencia social, que requieren 2.83 litros; servicios de entretenimiento y recreativas, 2.65 litros; residencia de asistencia social y salud, 2.35 litros, y los servicios de alojamiento temporal, que requieren dos litros de agua por unidad monetaria del VBP del sector respectivo. Las actividades manufactureras registran un valor medio de 0.130 litros por peso producido, que se ubica debajo de la media de la economía; mientras que actividades específicas varían su coeficiente dependiendo del tipo de manufactura. La industria de las bebidas y el tabaco requieren de 0.380 litros, en tanto que la industria alimentaria demanda 0.170 litros por peso de su valor bruto de la producción. La industria de la madera se ubica debajo de la media, con 0.03 litros por peso de VBP.

La actividad agrícola es usuaria intensiva de agua de primer uso (registra un elevado coeficiente de uso directo de agua), y su producción a su vez se utiliza como insumo de la industria alimentaria, relación que explica por qué esta última actividad finalmente produce bienes intensivos en el uso del agua; este efecto indirecto en el uso del agua es el que precisamente se capta en el indicador denominado multiplicador de agua virtual (MAV).

Finalmente, el cálculo de los MAV para cada actividad se registra en la cuarta columna del cuadro 1.

Los MAV registran valores que van desde 0.07 litros para la industria de la madera hasta 11.44 litros para la ganadería, e indican las cantidades totales de agua que requieren ambas actividades (directa e indirectamente) para producir una unidad monetaria de demanda final. El MAV para la industria alimentaria es de

• ISSN 2007-2422

0.99 litros (990 ml) e indica que para producir un peso de valor en la producción de alimentos se requieren 170 ml de agua de primer uso (forma directa) y 820 ml de agua de manera indirecta. Es así que el MAV siempre será mayor o igual al coeficiente directo del agua. En la cuenca, el MAV es mayor en 57% respecto al coeficiente de requerimientos directos del recurso hídrico.

Asimismo, la agricultura y otras actividades primarias registran un MAV de 3.67 litros, que resulta 46.8% mayor al coeficiente de requerimiento directo del agua (2.50 litros), ya que necesita de insumos que demandan una cantidad importante de agua en su producción. La actividad ganadera registra un elevado coeficiente directo de agua (11.14) y su MAV se incrementa en sólo 0.26%.

La actividad comercial registra un MAV de 0.07 litros, valor muy alto respecto a su requerimiento directo de sólo 0.01 litros debido a que los bienes y servicios que comercia demandan cantidades importantes de agua para su producción. Por ejemplo, los productos agrícolas y ganaderos, alimentos procesados, y productos de la industria química, entre otros.

Dentro de las actividades manufacturas, la industria alimentaria tiene un MAV de 0.99 litros, valor mayor en 495% respecto a su coeficiente directo (0.17 litros) debido a que sus insumos son de origen agrícola, por ende, necesita una gran cantidad de agua en su producción.

Dentro de los servicios destacan por su elevado MAV los de asistencia social (2.90 litros) y entretenimiento (2.77 litros), que se explica por el uso de agua incorporada directamente en su proceso de elaboración.

Contenido de agua virtual en la demanda final de la CVM

El agua virtual involucrada en la obtención de la demanda final se estima a partir de los MAV. Para efectos del cálculo, la demanda final total de la MIP-CVM-2008 se clasificó en tres categorías:

a) Gasto doméstico en la CVM (vector f^{CVM}), que incluye el consumo privado y del gobierno, la inversión y variación de existencias.
b) Exportaciones al resto de México (f^{RMEX}).
c) Exportaciones al resto del mundo (f^{RM}).

El agua virtual contenida en cada categoría se estima para cada actividad económica. Dichas magnitudes monetarias se multiplican por los MAV correspondientes. Por ejemplo, las exportaciones al resto de México se multiplican por sus MAV, $\sum_{i=1}^{80} y_j l_{ij} f_j^{\mathrm{RMEX}}$ para $j = 1,\ldots,80$. El resultado es la cantidad de agua virtual involucrada en la producción de las exportaciones en cada actividad j. Para las siguientes categorías de demanda final se sigue el mismo procedimiento.

En el cuadro 2a se registran las estimaciones del agua virtual para la CVM en 2008; las primeras tres columnas registran cada componente y la cuarta columna la demanda final total. En dicho cuadro se observa que 43.51% de la producción manufacturera se destina a la exportación, en primer lugar al resto del mundo, en segundo lugar al resto de México; el 56.48% restante se destina al gasto doméstico. Las cantidades de agua virtual estimadas por sector se registran en la columna 5 a 8 del cuadro 2a. Por ejemplo, la industria alimentaria exporta al resto del mundo productos con un valor de 6 806 millones de pesos, que requirieron para su producción de 6.74 hm^3 de agua virtual.

Un resumen del cuadro 2a se presenta en el cuadro 2, en el que las actividades se agruparon en los sectores de agricultura y otras actividades primarias; generación y suministro de electricidad, agua y gas; construcción; industrias manufactureras; comercio; transporte, correo y almacenamiento, y servicios. Los datos muestran porcentajes de la demanda final total (3.209 billones de pesos) y del total de agua virtual requerida para su producción (1 260 hm^3).

En el cuadro 2 se observa que el gasto doméstico en bienes de origen agrícola y actividades primarias representa 1.34% de la demanda final total y requiere 8.28% del total de agua virtual utilizada, lo cual muestra que este componente de la demanda sea intensiva en el uso del agua. Lo mismo sucede con el gasto doméstico en

ISSN 2007-2422

Cuadro 2. Resultados agregados de la demanda final y agua virtual para la cuenca del valle de México, 2008 (porcentajes).

Sectores	Componentes de la demanda final			
	Gasto doméstico [a)]	Exportación al resto de la economía mexicana	Exportación al resto del mundo	Demanda final
Demanda final				
% del total de la demanda final				
Agricultura y otras actividades primarias	1.34	0.00	0.14	**1.48**
Generación y suministro de electricidad, agua y gas	0.21	0.00	0.00	**0.22**
Construcción	10.90	0.00	0.00	**10.90**
Industrias manufactureras	9.67	1.05	6.40	**17.12**
Comercio	11.45	0.44	2.68	**14.57**
Transporte, correo y almacenamiento	6.64	1.84	1.08	**9.56**
Servicios	35.26	10.14	0.76	**46.16**
Total	75.47	13.47	11.05	**100**
Contenido de agua virtual en la demanda final				
% del total de agua virtual				
Agricultura y otras actividades primarias	8.28	0.24	0.89	**9.40**
Generación y suministro de electricidad, agua y gas	0.07	0.00	0.00	**0.07**
Construcción	4.43	0.00	0.00	**4.43**
Industrias manufactureras	15.00	0.49	3.66	**19.15**
Comercio	1.90	0.07	0.44	**2.42**
Transporte, correo y almacenamiento	7.57	3.40	2.01	**12.98**
Servicios	39.99	11.03	0.53	**51.54**
Total	**77.24**	**15.24**	**7.53**	**100**

a) El gasto doméstico incluye el consumo privado de las familias, el gasto de gobierno, formación bruta de capital fijo y variación de existencias.
Fuente: elaboración propia a partir de la MIP-CVM, 2008.

productos manufacturados, que explican 9.67% de la demanda final y 15% del total del agua virtual en la cuenca.

El sector construcción representa 10.9% de la demanda final total y 4.43% del agua virtual total, destacando que todo el rubro se destina al gasto doméstico. Los servicios explican 35% de la demanda final total (dirigido al gasto doméstico) y requieren 39.99% del agua virtual total, sugiriendo el uso extensivo del agua en algunas de las actividades de los mismos.

El comercio explica en gasto doméstico 11.45% de la demanda final y sólo 1.90% del agua virtual total, mostrando sus bajos requerimientos de agua. Las exportaciones del sector comercio representan 3.12% de la demanda final y 0.52% del total del agua virtual en la misma.

Lo más interesante es que las exportaciones manufactureras representan 7.45% de la demanda final y sólo requieren 4.15% del agua virtual contenida en la demanda final, sugiriendo cierta especialización en la exportación de bienes con bajo contenido de agua.

Contenido de agua virtual en el comercio de la CVM

Los resultados anteriores señalan que los productos agrícolas y los manufacturados dirigidos al consumo doméstico son producidos con alto contenido de agua. En este apartado interesa investigar si a través del comercio exterior en la CVM existe exportación o importación neta de agua virtual.

• ISSN 2007-2422

Cuadro 2a. Contenido de agua virtual en los componentes de la demanda final de la Cuenca del Valle de México.

Actividades	Consumo a)	Exportación al resto de la economía mexicana	Exportación al resto del mundo	Demanda final	Consumo doméstico a)	Exportación al resto de la economía mexicana	Exportación al resto del mundo	Demanda final
	Millones de pesos				Agua virtual (hm^3)			
Agricultura y otras actividades primarias b)	35 643	53	3 926	39 622	21.29	3.02	5.75	30.06
Ganadería	7 259	0	473	7 732	83.04	0.00	5.41	88.45
Total de agricultura y otras actividades primarias	**42 902**	**53**	**4,399**	**47 354**	**104.33**	**3.02**	**11.16**	**118.51**
Total de generación y suministro de electricidad, agua y gas	**6 861**	**0**	**61**	**6 921**	**0.94**	**0.00**	**0.01**	**0.94**
Total de construcción	**349 985**	**0**	**0**	**349 985**	**55.83**	**0.00**	**0.00**	**55.83**
Industria alimentaria	145 053	1 147	6 806	153 006	143.65	1.14	6.74	151.52
Industria de bebidas y tabaco	31 706	1 469	4 899	38 074	20.74	0.96	3.20	24.91
Fabricación de insumos textiles	2 906	0	5 994	8 900	3.04	0.00	6.28	9.32
Confección de productos textiles	891	0	3 400	4 290	0.23	0.00	0.87	1.09
Fabricación de prendas de vestir	10 818	0	22 993	33 811	2.59	0.00	5.51	8.10
Fabricación de productos de cuero y piel	1 963	0	520	2 483	0.87	0.00	0.23	1.10
Industria de madera	1 024	0	363	1 387	0.07	0.00	0.03	0.10
Industria del papel	5 144	0	4 000	9 143	2.00	0.00	1.55	3.55
Impresión e industrias conexas	3 142	766	2 519	6 427	1.06	0.26	0.85	2.17
Otras industrias	107 746	30 349	153 851	291 946	14.75	3.83	20.86	39.44
Total de industrias manufactureras	**310 393**	**33 731**	**205 344**	**549 469**	**189.00**	**6.19**	**46.12**	**241.31**
Total de comercio	**367 454**	**14 070**	**86 028**	**467 552**	**23.93**	**0.92**	**5.60**	**30.44**
Total de transporte, correo y almacenamiento	**213 003**	**58 983**	**34 705**	**306 692**	**95.38**	**42.87**	**25.37**	**163.62**
Industria fílmica, de video y sonido	7 206	20,926	53	28,185	10.36	30.08	0.08	40.52
Residencias de asistencia social y salud	442	136	0	578	1.06	0.33	0.00	1.38
Otros servicios de asistencia social	648	0	0	648	1.88	0.00	0.00	1.88
Servicios de entretenimiento y recreativos	5 207	4 200	0	9 407	14.40	11.62	0.00	26.02
Servicios de alojamiento temporal	14 003	0	0	14 003	28.83	0.00	0.00	28.83
Servicios de preparación de alimentos y bebidas	46 934	0	0	46 934	42.00	0.00	0.00	42.00
Asociaciones y organizaciones	22 319	10 139	0	32 458	37.75	17.15	0.00	54.90
Otros servicios	1 034 964	290 180	24 211	1 349 355	367.68	79.84	6.55	454.06
Total de servicios	**1 131 723**	**325 580**	**24 264**	**1 481 567**	**503.96**	**139.01**	**6.62**	**649.59**
Total de 80 actividades	**2 422 322**	**432 417**	**354 801**	**3 209 540**	**973.36**	**192.01**	**94.88**	**1 260.25**

a) El consumo total incluye el consumo privado de las familias, el gasto de gobierno, formación bruta de capital fijo y variación de existencias.
Fuente: elaboración propia a partir de la MIP-CVM, 2008.

ISSN 2007-2422

De acuerdo con la teoría de Heckscher–Ohlin del comercio internacional, un país exporta los productos en los cuales tiene una ventaja comparativa. Estos son los productos que usan intensivamente los factores de la producción en los cuales existe abundancia relativa en el país. De la misma manera, los países importan productos que usan intensivamente factores escasos de la producción. Tomando el agua como factor de producción, la CVM no tiene ventajas comparativas para producir bienes intensivos en agua.

Esta sección estima el contenido de agua virtual de las exportaciones e importaciones. Se asume que las exportaciones, por ejemplo, las que se realizan con el resto del mundo, se incrementan en un millón de pesos de acuerdo con la mezcla de productos en las exportaciones corrientes. Por lo tanto, un vector $\bar{f}^{\text{RMEX}}$ se construye con la misma distribución como f^{RMEX}, pero sus elementos suman un millón de pesos. Esto es:

$$\bar{f}_j^{\text{RMEX}} = \left(1\,000\,000\right) f_j^{\text{RMEX}} \Big/ \sum_i f_j^{\text{RMEX}}$$

Los requerimientos de agua (o contenido de agua virtual) de las exportaciones adicionales del producto j son entonces obtenidas como:

$$\sum_{i=1}^{80} y_i l_{ij} \bar{f}_j^{\text{RMEX}}$$

Dejando el balance del comercio regional sin afectación, se asume que las importaciones (en este caso del resto de México) también se incrementan en un millón. Esto implica que estos productos no necesitan ser producidos en la CVM, de tal manera que los requerimientos regionales de agua decrecen. Denotando el vector de importaciones como $\bar{m}_j^{\text{RMEX}}$ tenemos que el incremento de un millón de pesos en las importaciones implica que las importaciones de los productos j se incrementan en:

$$\bar{m}_j^{\text{RMEX}} = \left(1\,000\,000\right) m_j^{\text{RMEX}} \Big/ \sum_i m_j^{\text{RMEX}}$$

Entonces los requerimientos de agua decrecen en:

$$\sum_{i=1}^{80} y_i l_{ij} \bar{m}_j^{\text{RMEX}}$$

a causa del incremento de las importaciones de los productos j.

Los requerimientos totales de agua a causa de las exportaciones adicionales están dados por:

$$\sum_{j=1}^{80} \sum_{i=1}^{80} y_i l_{ij} \bar{f}_j^{\text{RMEX}}$$

y la reducción total de agua por las importaciones adicionales son:

$$\sum_{j=1}^{80} \sum_{i=1}^{80} y_i l_{ij} \bar{m}_j^{\text{RMEX}}$$

En notación matricial, las expresiones son dadas por $y'L\bar{f}^{\text{RMEX}}$ y $y'L\bar{m}^{\text{RMEX}}$, respectivamente.

De acuerdo con la teoría de Heckscher–Ohlin, una región en la que escasea el agua se esperaría que ahorrara agua por el incremento de su comercio. Esto es:

$$y'L\bar{m}^{\text{RMEX}} > y'L\bar{f}^{\text{RMEX}}$$

En otras palabras, el contenido de agua virtual de sus importaciones debe ser mayor que el contenido de agua virtual de sus exportaciones.

En el cuadro 3 se registra el contenido de agua virtual del comercio de la CVM con el resto de México y el mundo, así como el comercio total. El vector de importaciones sólo cubre los productos que son producidos en la cuenca. La balanza comercial de agua virtual con el resto de la economía de México muestra que la importación de agua virtual representa 1.39 veces las exportaciones de agua, y en el comercio con el resto del mundo, las importaciones representan dos veces las exportaciones de agua virtual. El resultado para la balanza total es que se importa agua en 1.65 veces lo que se exporta, lo que confirma la teoría de Heckscher–Ohlin, en el sentido de que una región con escasez del recurso (como es el caso de la CVM) tiende a

• ISSN 2007-2422

Cuadro 3. Contenido de agua virtual en un millón de pesos en las exportaciones e importaciones, cuenca del valle de México, 2008.

Actividades	Exportaciones		Importaciones		Balance sectorial de agua virtual
	Estructura monetaria [a)]	Contenido de agua virtual	Estructura monetaria [a)]	Contenido de agua virtual	
	%	m^3	$	m^3	m^3
Comercio con el resto de la economía mexicana					
Agricultura y otras actividades primarias	0.01	6.98	12.73	337.22	-330.23
Generación y suministro de electricidad, agua y gas	0.00	0.00	4.33	4.93	-4.93
Construcción	0.00	0.00	0.19	0.25	-0.25
Industrias manufactureras	7.80	14.31	32.20	165.14	-150.83
Comercio	3.25	2.12	34.52	22.48	-20.36
Transporte, correo y almacenamiento	13.64	99.14	6.73	28.84	70.30
Servicios	75.29	321.48	9.30	58.98	262.49
Total de 80 actividades	**100**	**444.03**	**100**	**617.84**	**-173.81**
Comercio con el resto del mundo					
Agricultura y otras actividades primarias	1.24	31.45	3.92	313.57	-282.12
Generación y suministro de electricidad, agua y gas	0.02	0.02	0.00	0.00	0.01
Construcción	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Industrias manufactureras	57.88	129.99	83.67	176.12	-46.13
Comercio	24.25	15.79	0.00	0.00	15.79
Transporte, correo y almacenamiento	9.78	71.51	0.66	3.72	67.79
Servicios	6.84	18.66	11.75	44.78	-26.12
Total de 80 actividades	**100**	**267.41**	**100**	**538.19**	**-270.78**
Comercio total					
Agricultura y otras actividades primarias	0.57	18.01	10.97	332.48	-314.47
Generación y suministro de electricidad, agua y gas	0.01	0.01	3.47	3.94	-3.94
Construcción	0.00	0.00	0.15	0.20	-0.20
Industrias manufactureras	30.37	66.45	42.50	167.34	-100.89
Comercio	12.72	8.28	27.61	17.98	-9.70
Transporte, correo y almacenamiento	11.90	86.68	5.51	23.81	62.87
Servicios	44.44	185.00	9.79	56.14	128.86
Total de 80 actividades	**100**	**364.43**	**100**	**601.89**	**-237.47**

a) La estructura se basa en las exportaciones e importaciones valuadas en millones de pesos, MIP-CVM 2008.
Fuente: elaboración propia a partir de la MIP-CVM, 2008.

ISSN 2007-2422

importar productos con alto contenido de agua.

En la balanza total se registra que, con un comercio de un millón de pesos de exportaciones e importaciones, el saldo neto es la entrada de 237.47 m^3 de agua virtual a la CVM. La CVM es una región importadora de agua virtual porque importa productos agrícolas (y otras actividades primarias) tanto del resto de México como del mundo (-314.47 m^3 en la balanza total). La importación de productos manufacturados es el segundo rubro que explica la estructura de importaciones de agua, con un saldo en la balanza total de -100.89 m^3 de agua virtual. Por otra parte, un factor que está presionando la exportación de agua virtual es el sector servicios, que registra un saldo positivo de 128.83 m^3 de agua, lo que sugiere la importancia de que este sector aumente su eficiencia en el uso del agua.

Conclusiones

La CVM registra una dotación de recursos hídricos (2 902.29 hm^3) que no puede incrementarse en el mediano plazo, al mismo tiempo que enfrenta una demanda de agua que rebasa la oferta debido a la creciente actividad económica de la región, así como por albergar el asentamiento urbano más grande del país (ZMVM).

Más de la mitad de la estructura económica de la CVM se explica por las actividades de servicios diversos, seguida en importancia por las actividades comerciales y las actividades manufactureras; la producción agrícola juega un papel marginal en esta región. La presión que las actividades económicas ejercen sobre los recursos hídricos concuerda con el mismo orden de importancia dentro de la estructura económica. Una mayor precisión para identificar actividades económicas específicas que presionan más a los recursos hídricos de la cuenca es a través de la estimación de sus respectivos MVA, indicador que estima la cantidad de litros de agua que cada actividad económica utiliza (directa e indirectamente) para generar un valor incremental de un peso de su respectiva demanda final. Los resultados reportan que el MVA promedio en la cuenca es de 0.310 litros, valor que indica que para producir un peso del valor de la producción en la región se necesitan 310 ml de agua. Las actividades que registraron los mayores requerimientos de agua en sus procesos de producción (es decir, los mayores MVA) son elaboración de productos agrícolas y ganaderos, seguidos de actividades de servicios relacionadas con hospedaje; así como algunas manufacturas de alimentos, papel y textiles. En el otro extremo se encuentran las actividades que registran los MVA más bajos, esto es, las asociadas con el comercio.

Un hallazgo interesante en la investigación es que en la cuenca el agua está siendo utilizada en actividades de baja intensidad del recurso, como en el comercio y actividades manufactureras para la exportación. Las exportaciones manufactureras de la cuenca representan 7.45% de la demanda final total y sólo necesitan 4.15% del agua virtual contenida en la misma, sugiriendo la especialización de la región en exportaciones de bienes con bajo contenido de agua.

Lo que es más interesante aún es que exportamos bienes con baja intensidad en el uso del agua (productos manufacturados), e importamos bienes y servicios intensivos en el uso del recurso (productos agrícolas, ganaderos), lo que califica a la CVM como una región importadora neta de agua virtual. Este hallazgo parece confirmar la teoría de Heckscher–Ohlin del comercio internacional, en el sentido de que importamos bienes con elevado contenido del recurso escaso —en este caso el agua— y explica la racionalidad económica de una región con el mayor estrés hídrico del país.

La conclusión central de la investigación es que se requiere poner especial atención a las actividades económicas que participan con un pequeño porcentaje dentro de la estructura de la producción de la CVM y al mismo tiempo participan en forma considerable del recurso hídrico. Por ejemplo, la agricultura, que produce 1.34% de la demanda final total y absorbe el 8.28% del agua virtual requerida para producir la demanda final de la cuenca. Otro foco rojo es el caso de los productos manufacturados dirigidos al consumo doméstico, que explican

• ISSN 2007-2422

9.67% de la demanda final y 15% del total del agua virtual en la cuenca. Estos resultados tienen implicaciones interesantes en términos de la gestión del agua en la CVM, pues señalan las actividades específicas sobre las que se deben definir políticas hídricas que apunten a lograr un uso eficiente del recurso o promuevan estímulos especiales para su relocalización.

Además de considerar los impactos favorables de promover la importación de agua virtual en la cuenca, se sugiere otro conjunto de políticas públicas que ayudan a reducir el estrés hídrico en la CVM. La primera es promover el cambio tecnológico mediante la adopción de nuevas tecnologías ahorradoras de agua en los procesos productivos, de tal forma que la cantidad de agua utilizada directamente en cada proceso productivo se reduzca; esto requiere de inversiones adicionales en los sectores afectados. La segunda es incentivar una reestructuración de la producción en el sentido que ya se viene dando, alentando actividades de baja intensidad en el uso del agua. La tercera es introducir un aumento en el precio del agua para las actividades económicas; el efecto esperando es que los productores la utilizarán en forma más eficiente, por ejemplo, reduciendo su desperdicio. La cuarta es fomentar el uso de agua tratada para los procesos industriales que lo permitan, generando incentivos económicos para su adopción.

Finalmente se destaca la importancia de continuar profundizando la actual tendencia de reducir la exportación de agua virtual en la CVM, porque se hace a costa de una mayor sobreexplotación de los acuíferos y de recursos hídricos importados.

Agradecimientos

Agradecemos el financiamiento recibido por Conacyt para la realización de la investigación y redacción del artículo en el marco del proyecto: "Especialidad en economía ambiental, aplicada al manejo económico y sustentable del agua (EEA)", Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo sobre el Agua Conagua-Conacyt clave Conagua-2012-2-198723. Así como el apoyo recibido a través de la Cátedra Conacyt-UAM número 1812, "Modelo hídrico y económico de la cuenca del valle de México, 2014". No podemos dejar de agradecer en forma especial la colaboración del economista Juan Carlos Sánchez Herrera en el procesamiento de la información.

Referencias

Allan, J. A. (1997). *Virtual Water: a long term solution for water short Middle Eastern economics?* Paper presented at the 1997 British Association Festival of Science. Water and Development Session, Roger Stevens Lecture Theatre, University of Leeds, TUE.51, 14.45. Recuperado de http://web.macam.ac.il/~arnon/Int-ME/water/OCC03.PDF

Allan, J. A. (1999). Water stress and global mitigation: water food and trade. *Arid lands Newsletter*, No. 45. Recuperado de http://ag.arizona.edu/OALS/ALN/aln45/allan.html

Chapagain, A., & Hoekstra, A. (2004). *Water Footprint of Nations*. Value of Water Research Report Series, No 16, UNESCO-IHE, Delft, Netherlands, Recuperado de www.waterfootprint.org/Reports/Report16Vol1.pdf

Conagua (2009). *Estadísticas del Agua de la Región Hidrológico-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México*, Edición 2009, SEMARNAT, México.

Conagua (2010). *Estadísticas del Agua en México, Edición 2010.* SEMARNAT, México.

Dietzenbacher, E., & Velázquez, E. (2007). Analyzing Andalusian Virtual Water Trade in an Input-Output Framework, *Regional Studies*, 41 (2), 185-196.

Debaere, P. (2014). The Global Economics of Water: Is Water a Source of Comparative Advantage? American Economic Journal: Applied Economics 2014, 6(2): 32–48. Recuperado de http://dx.doi.org/10.1257/app.6.2.32

Hoekstra, A., & Chapagain, A. (2008). *Globalization of Water: Sharing the Planet`s Freshwater Resources*. Oxford: Blackwell.

INEGI (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*. INEGI, México. Recuperado de http://www.inegi.org.mx/sistemas/consulta_resultados/ageb_urb2010.aspx?c=28111&s=est

Lenzen, M., & Foran, B. (2001). An input–output analysis of Australian water usage. *Water Policy* 3(4), 321–340. Recuperado de http://down.cenet.org.cn/upfile/94/200743012028171.pdf

Rodríguez, L., & Morales, J. (2013). Integración de un Sistema de Cuentas Económicas e Hídricas en la Cuenca del Valle de México. *Realidad, Datos y Espacio Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 4(1), 72-89.

MIP-CVM (2008). *Matriz insumo-producto de la Cuenca del Valle de México (MIP-CVM-2008).* Proyecto Multidisciplinario: acuerdos del rector 08/2009. UAM, México (documento interno).

UAM (2010). *Modelación del Sistema Hídrico de la Cuenca del valle de México. Proyecto Multidisciplinario: acuerdos del rector 08/2009*. México: UAM (documento interno).

Dirección institucional de los autores

Dra. Lilia Rodríguez-Tapia
Dr. Jorge A. Morales-Novelo
Dra. Fabiola S. Sosa-Rodríguez

Profesores-Investigadores
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco
Departamento de Economía
Área de Investigación Crecimiento y Medio Ambiente
Cubículo Eco C, Edificio H 1er piso
Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas,
Delegación Azcapotzalco
02200 Ciudad de México, México
Teléfono: +52 (55) 5318 9427
lrt3@prodigy.net.mx
jamn8647@gmail.com
fssosa@gmail.com

Dr. Juan Carlos Altamirano-Cabrera

World Resources Institute
10 G St NE, Washington, D.C., USA
Teléfono: +1 (202) 729 7600
jcaltamirano@wri.org

Dr. Francisco Torres-Ayala

Profesor-Investigador Cátedra Conacyt
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco
Departamento de Economía
Cubículo Eco C, Edificio H 1er piso
Área de Investigación Crecimiento y Medio Ambiente
Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas,
Delegación Azcapotzalco
02200 Ciudad de México, México
Teléfono: +52 (55) 5318 9427
tfrancisco.match@gmail.com

Haga clic aquí para escribir al autor

• ISSN 2007-2422

Evaluación de la sostenibilidad de cuencas mediterráneas semiáridas. Caso de estudio: cuenca del Segura, España

• Javier Senent-Aparicio* • Julio Pérez-Sánchez • Alicia María Bielsa-Artero •
Universidad Católica San Antonio de Murcia, España
*Autor de correspondencia

Resumen

Senent-Aparicio, J., Pérez-Sánchez, J., & Bielsa-Artero, A. M. (marzo-abril, 2016). Evaluación de la sostenibilidad de cuencas mediterráneas semiáridas. Caso de estudio: cuenca del Segura, España. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *7*(2), 67-84.

Desde la introducción del concepto de desarrollo sostenible en el Informe Brundtland a finales del siglo pasado, numerosos científicos han trabajado en la medición objetiva de la sostenibilidad mediante índices. La aplicación de estos índices a la gestión de los recursos hídricos permite evaluar el estado actual de los mismos y servir como herramienta de ayuda a la toma de decisiones por parte de los organismos competentes. Uno de los índices más utilizados es el Índice de Sostenibilidad de Cuencas. Este índice ha sido aplicado por distintos investigadores en numerosas cuencas a lo largo de todo el mundo, principalmente América Central y Sudamérica. Sin embargo, no se han encontrado referencias sobre su aplicación en Europa. El objetivo de este estudio es la aplicación del Índice de Sostenibilidad de Cuencas en una cuenca mediterránea semiárida, como es la cuenca del Segura (España). Se han adaptado algunos de los indicadores a las características del caso de estudio. La cuenca del Segura se caracteriza por su alto déficit hídrico y por estar sometida a los requisitos exigidos por la Directiva Marco del Agua. Se ha obtenido un valor del índice de sostenibilidad para la cuenca del Segura durante el periodo 2006-2010 de 0.64, lo que equivale a un nivel intermedio de sostenibilidad. La metodología propuesta puede ser utilizada en numerosas cuencas mediterráneas europeas que presentan condiciones hidrológicas, ambientales, sociales y políticas muy similares a las del caso objeto de estudio.

Palabras clave: hidrología, cuenca Segura, índice de sostenibilidad, modelo presión-estado-respuesta, gestión integrada de cuencas.

Abstract

Senent-Aparicio, J., Pérez-Sánchez, J., & Bielsa-Artero, A. M. (March-April, 2016). Assessment of Sustainability in Semiarid Mediterranean Basins: Case Study of the Segura Basin, Spain. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 7*(2), *67-84.*

Ever since the concept of sustainable development was introduced by the Brundtland Report in the late 1900s, many scientists have worked on objectively measuring sustainability based on indices. The application of these indices to water resource management makes it possible to evaluate the current state of this resource and provides a tool to help decision-makers. One of the most common indices is the Watershed Sustainability Index. This has been applied by various investigators in a large number of basins throughout the world, and particularly in Central and South America. Nevertheless, references to its application in Europe have not been found. The objective of this study was to apply the Watershed Sustainability Index in a semiarid Mediterranean basin, such as the Segura Basin in Spain. Some of the indicators were adapted to the characteristics of the case study. The Segura Basin has a large water deficit and is subject to the requirements stipulated by the Water Framework Directive. A sustainability index of 0.64 was obtained for the Segura Basin during the period 2006-2010, which is equal to an intermediate sustainability level. The methodology proposed can be used for many other European Mediterranean basins with hydrological, environmental, social and political conditions that are very similar to those of the case study.

***Keywords**: Hydrology, Segura basin, sustainability index, pressure-state-response model, integrated watershed management.*

Recibido: 16/10/2014
Aceptado: 28/09/2015

Introducción

La Conferencia de Naciones Unidas (ONU) sobre el Medio Humano, celebrada en Estocolmo en el año 1972, marca un punto de inflexión en el desarrollo de la política internacional del medio ambiente, pues fue la primera gran conferencia de la ONU sobre cuestiones ambientales internacionales. Años más tarde, a raíz de la celebración de esta conferencia, se publica el denominado Informe Brundtland, donde por primera vez se introduce el concepto de desarrollo sostenible (Brundtland, 1987).

Desde la publicación de este informe, numerosas instituciones y organizaciones han dedicado muchos esfuerzos a la medición objetiva de la sostenibilidad. Un claro ejemplo de tales esfuerzos es el desarrollo de herramientas de evaluación basadas en indicadores de sostenibilidad, lo que se conoce como índices de sostenibilidad. Estos índices, aplicados a los recursos hídricos, permiten identificar todos los factores que contribuyen a la mejora de los recursos hídricos, de modo que esta información se pueda utilizar tanto para dar a conocer el estado actual de los recursos hídricos de una zona a todos los usuarios de la misma, como para ayudar a la toma de decisiones por parte de los organismos competentes en materia de gestión de recursos hídricos (Juwana, Muttil, & Perera, 2012).

En 2005, la UNESCO crea el Programa Hidrológico Internacional (PHI) como un instrumento gracias al cual los estados miembros pretenden mejorar su conocimiento del ciclo hídrico e incrementar su capacidad de administrar y explotar mejor sus recursos hídricos (UNESCO, 2005). Este programa tiene como objetivo la minimización de los riesgos a los que están expuestos los sistemas de recursos hídricos, teniendo en cuenta las exigencias e interacciones sociales y desarrollando métodos que permitan una gestión racional de los recursos hídricos, incluyendo la protección del medio ambiente. Para la consecución de este objetivo era necesaria la aplicación de un índice de sostenibilidad de cuencas que integrará no solamente cuestiones de carácter meramente hidrológico, sino que también tuviera en consideración los diferentes aspectos socioeconómicos y medioambientales que influyen en la gestión sostenible de los recursos hídricos de una cuenca (Chaves & Alipaz, 2007). Todos estos aspectos quedan integrados dentro del Índice de Sostenibilidad de Cuencas o Watershed Sustainability Index (WSI), seleccionado por la UNESCO para su PHI.

Tal y como se puede observar en la bibliografía consultada, el WSI ha sido aplicado por distintos investigadores en numerosas cuencas a lo largo de todo el mundo, principalmente en América Central y Sudamérica (Chaves, 2009; Catano, Marchand, Staley, & Wang, 2009; Cortés *et al*., 2012; Preciado-Jiménez, Aparicio, Güitrón-De-Los-Reyes, & Hidalgo-Toledo, 2013; Elfithri, 2013; Firdaus, Nakagoshi, & Idris, 2014). Sin embargo, este índice no ha sido todavía aplicado en cuencas europeas. El objetivo del trabajo que aquí se presenta es, por un lado, analizar la sostenibilidad de la gestión de los recursos hídricos en una cuenca mediterránea semiárida, y por otro, adaptar los parámetros propuestos por Chaves y Alipaz a las condiciones climáticas y político-sociales que condicionan la gestión de los recursos hídricos en el área de estudio.

Descripción del área de estudio

La cuenca del río Segura, situada en el sureste de España (figura 1), cuenta con una superficie aproximada de 20 234 km^2 (19 025 km^2, si se tiene sólo en cuenta la parte continental, excluyendo las aguas costeras) y afecta a cuatro comunidades autónomas: Murcia, Andalucía (provincias de Jaén, Granada y Almería), Castilla-La Mancha (provincia de Albacete) y Valencia (provincia de Alicante). Tal y como se puede observar en la figura 1, a efectos de funcionamiento hidrológico y de acuerdo con lo establecido en el Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura (PHCS), la cuenca se puede dividir en 14 zonas distintas (CHS, 2013).

La precipitación media anual es de unos 382 mm, que se caracterizan por sus grandes desequilibrios temporales y por un claro contraste

• ISSN 2007-2422

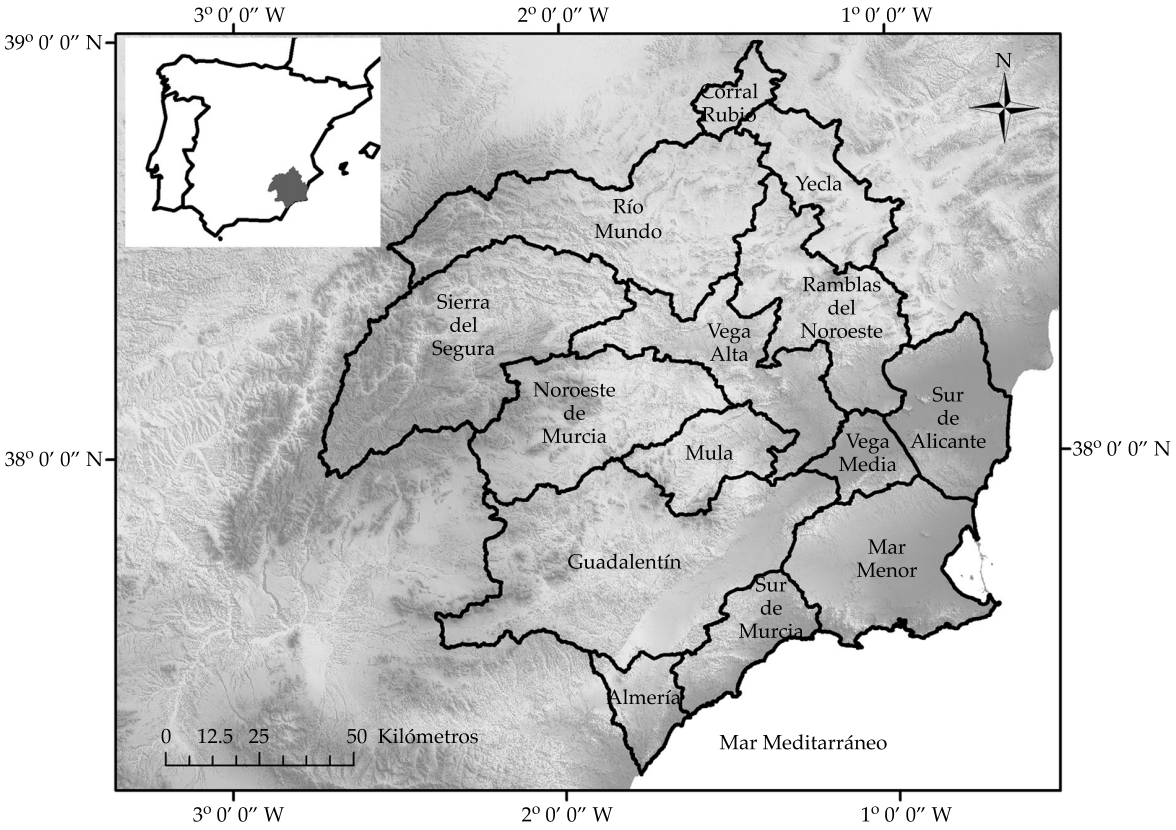


Figura 1. Mapa de situación y definición de zonas hidrológicas.

espacial entre las zonas de cabecera, y las partes medias y bajas de la cuenca. Un rasgo característico respecto a la pluviometría de la cuenca es la existencia de episodios de fuertes lluvias —fenómeno conocido como "gota fría"—, caracterizados por precipitaciones cortas y muy intensas, que provocan grandes avenidas con un marcado carácter torrencial. Este fenómeno tiene lugar en los meses de otoño. Por otro lado, también son frecuentes los episodios de sequías en los meses de verano, con precipitaciones prácticamente nulas, así como los periodos de sequía interanuales.

Al igual que ocurre con el régimen pluviométrico, el térmico está también muy influenciado por la orografía. Como valores extremos, los 10 ºC de la isoterma media anual que se presenta en la sierra del Segura, y los 18 ºC de temperatura media anual en el Sur de Alicante y en algunas zonas costeras. Por otro lado, la evapotranspiración potencial media es del orden de 992 mm, mientras que la evapotranspiración real se estima en 339 mm anuales. La escorrentía media total representa un 13% de la precipitación media total, siendo este porcentaje el más bajo de la península ibérica (CHS, 2013).

En las últimas décadas del siglo pasado, la demanda total del agua en la cuenca del río Segura creció con tanta intensidad que se superaron los límites establecidos por los recursos naturales existentes, provocando un déficit estructural totalmente insostenible (Martínez-Fernández, Esteve-Selma, & Calvo-Sendín, 2000). Con las medidas impulsadas como consecuencia de la entrada en vigor de la Directiva Marco del Agua (DMA) se ha aliviado dicho déficit; sin embargo, al día de hoy este problema todavía no se ha solucionado.

ISSN 2007-2422

La cuenca del río Segura es una de las regiones con mayor estrés hídrico de la Europa Mediterránea. En términos globales, la demanda actual total es de 1 800 hm^3/año, de los cuales un 86% corresponde a la demanda agraria y un 10% a la demanda urbana. Frente a estos datos de demanda, las aportaciones en régimen natural rondan los 800 hm^3 anuales (CHS, 2013). En los últimos años se ha realizado un gran esfuerzo para minimizar en la medida de lo posible este déficit a través de la obtención de recursos no convencionales, como son los procedentes de la reutilización de aguas depuradas, la desalación y el trasvase de recursos hídricos procedentes de cuencas cercanas.

Metodología y datos

Descripción general del WSI

El Índice de Sostenibilidad de Cuencas (WSI) asume que la sostenibilidad de la cuenca como recurso depende de su hidrología (*H*), medio ambiente (*E*), vida (*L*) y de las políticas aplicadas en materia de recursos hídricos (*P*) (Chaves y Alipaz, 2007). A través de estos cuatro indicadores se puede obtener el *WSI* aplicando la siguiente ecuación:

$$\mathrm{WSI} = \left(H + E + L + P\right) / 4$$

Donde *H* es el indicador de hidrología (0-1); *E*, el indicador de medio ambiente (0-1); *L*, el indicador de vida (0-1), y *P* es el indicador de política (0-1). De la propia ecuación se deduce que se le da el mismo peso a cada uno de los indicadores y que, al igual que el resto de indicadores, el WSI variará entre 0 y 1. Cada uno de estos indicadores se analiza por separado, siguiendo un modelo presión-estado-respuesta (PER). Para ello, Chaves y Alipaz proponen una serie de parámetros que permiten representar de forma adecuada los procesos individuales que forman parte de cada indicador (cuadro 1). Además, estos parámetros permiten cierta flexibilidad para poder adaptarse a las condiciones particulares de la cuenca donde se pretende calcular el WSI. En este sentido, los autores sugieren establecer un límite máximo de 2 500 km^2 de superficie de cuenca para su correcta aplicación.

El modelo PER fue desarrollado por Rapport y Friend (1979), y ampliamente utilizado en todo el mundo como consecuencia de su implementación como modelo de desarrollo de indicadores ambientales por parte de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). Consiste en el análisis de la relación existente entre las actividades humanas (presión) y su impacto en el estado del medioambiente (estado), lo que provoca

Cuadro 1. Indicadores y parámetros del WSI.

Indicador	Presión	Estado	Respuesta
(*H*) hidrología	Variación en la disponibilidad de agua per cápita en el periodo	Disponibilidad *per cápita* de agua en la cuenca	Evolución en la eficiencia del uso del agua en el periodo analizado
	Variación en la DBO_5 del periodo en relación con el promedio	DBO_5 de la cuenca (promedio a largo plazo)	Evolución en el tratamiento / disposición de aguas servidas en el periodo analizado
(*E*) ambiente	EPI (rural y urbano) de la cuenca en el periodo	% de la cuenca con vegetación natural	Evolución en áreas protegidas en la cuenca (reservas, BMPs)
(*L*) vida	Variación en el (GDP) per cápita en la cuenca en el periodo analizado	IDH de la cuenca en el periodo anterior (ponderado)	Evolución del IDH de la cuenca en el periodo analizado
(*P*) política	Variación del IDH-Ed en el periodo analizado	Capacidad legal e institucional en GIRH en la cuenca	Evolución de los gastos en GIRH en la cuenca en el periodo analizado

• ISSN 2007-2422

una serie de acciones a realizar para poder dar solución a los problemas generados (respuesta). La ventaja de utilizar un modelo de este tipo es que, al incorporar las relaciones causa-efecto, permite conocer a usuarios y encargados de tomar las decisiones de las relaciones existentes entre los distintos parámetros y, por lo tanto, servir de ayuda al establecimiento o reorientación de las políticas aplicadas (OCDE, 2003).

En los cuadros 2, 3 y 4 se muestran los niveles con su respectiva puntuación propuestos por Chaves y Alipaz (2007). De este modo se obtendría la puntuación de cada uno de los indicadores, para a continuación aplicar la ecuación antes mencionada. Una vez obtenido el valor final del WSI, se podría considerar una sostenibilidad *baja* si WSI < 0.5; *intermedia*, si el rango varía entre 0.5 y 0.8, y *alta* si WSI > 0.8.

Adaptación de la metodología al caso de estudio y datos utilizados

En el presente estudio se aplica el WSI a la cuenca del río Segura. Dicha cuenca supera en superficie el límite máximo que establece la metodología de cálculo del WSI, por lo que se ha aplicado esta metodología a cada una de las 14 subcuencas definidas en el PHCS (CHS, 2013). De este modo, todas las subcuencas analizadas presentan una superficie inferior a los 2 500 km^2, salvo la subcuenca del Guadalentín, que supera ligeramente los 3 000 km^2, y la subcuenca de la

Cuadro 2. Descripción de los parámetros de presión, nivel y puntuación.

Indicador	Parámetros de presión	Nivel	Puntuación
(*H*) hidrología	Δ1 variación per cápita del agua disponible en la cuenca en el periodo estudiado, relativo al promedio a largo plazo (m^3/año·persona)	Δ1 ≤ −20%	0.00
		−20% < Δ1 ≤ −10%	0.25
		−10% < Δ1 ≤ 0%	0.50
		0% < Δ1 ≤ +10%	0.75
		Δ1 > +10%	1.00
	Δ2 variación DBO_5 en la cuenca durante el periodo estudiado, o en otro parámetro crítico, relativo al promedio a largo plazo (o histórico)	Δ2 ≥ 20%	0.00
		20% > Δ2 ≥ 10%	0.25
		10% > Δ2 ≥ 0%	0.50
		−10% ≤ Δ2 < 0%	0.75
		Δ2 < −10%	1.00
(*E*) ambiente	EPI de la cuenca (rural y urbana) en el periodo estudiado	EPI ≥ 20%	0.00
		20% > EPI ≥ 10%	0.25
		10% > EPI ≥ 5%	0.50
		5% > EPI ≥ 0%	0.75
		EPI < 0%	1.00
(*L*) vida	Variación de IDHPIB-Índice de renta per cápita (IPIB) en el periodo estudiado, relativo al periodo anterior	Δ ≤ −20%	0.00
		−20% < Δ ≤ −10%	0.25
		−10% < Δ ≤ 0%	0.50
		0% < Δ ≤ +10%	0.75
		Δ > +10%	1.00
(*P*) política	Variación en la cuenca del IDH-educación (IE) en el periodo estudiado, relativo al periodo previo	Δ ≤ −20%	0.00
		−20% < Δ ≤ −10%	0.25
		−10% < Δ ≤ 0%	0.50
		0% < Δ ≤ +10%	0.75
		Δ > +10%	1.00

ISSN 2007-2422

Cuadro 3. Descripción de los parámetros de estado, nivel y puntuación.

Indicador	Parámetros de estado	Nivel	Puntuación
(*H*) hidrología	*Wa* - Disponibilidad de agua per cápita (m^3/persona año) tanto en superficie como en fuentes de agua subterráneas en el periodo histórico	*Wa* ≤ 1.700	0.00
		1 700 < *Wa* ≤ 3 400	0.25
		3 400 < *Wa* ≤ 5 100	0.50
		5 100 < *Wa* ≤ 6 800	0.75
		6 800 < *Wa*	1.00
	Promedio DBO_5 (mg/l) de la cuenca a largo plazo (u otro parámetro crítico)	$DBO_5 \geq 10$	0.00
		$10 > DBO_5 \geq 5$	0.25
		$5 > DBO_5 \geq 3$	0.50
		$3 > DBO_5 \geq 1$	0.75
		$DBO_5 < 1$	1.00
(*E*) ambiente	Porcentaje de área (*Av*) de la cuenca bajo vegetación natural	*Av* ≤ 5%	0.00
		5% < *Av* ≤ 10%	0.25
		10% < *Av* ≤ 25%	0.50
		25% < *Av* ≤ 40%	0.75
		Av > 40%	1.00
(*L*) vida	IDH ponderado de cuenca en el periodo anterior (ponderado por población)	IDH ≤ 0.5	0.00
		0.5 < IDH ≤ 0.6	0.25
		0.6 < IDH ≤ 0.75	0.50
		0.75 < IDH ≤ 0.9	0.75
		IDH > 0.9	1.00
(*P*) política	Capacidad legal e institucional en GIRH en la cuenca (legal y organizacional)	Muy pobre	0.00
		Pobre	0.25
		Regular	0.50
		Bueno	0.75
		Excelente	1.00

Sierra del Segura, cuya superficie es de unos 2 600 km^2. Por lo tanto, se calculará el WSI por subcuenca para después obtener el WSI medio en toda la cuenca del Segura. Esta reducción de escala espacial dificulta la obtención de los distintos indicadores que forman parte de la metodología, pues algunos de ellos están disponibles a escala de cuenca o a escala provincial. Además, no existen antecedentes de la aplicación del WSI ni en la cuenca del Segura, ni en regiones semiáridas mediterráneas. Es por ello, como se comenta a lo largo de este apartado, que se han tenido que realizar una serie de ajustes a los datos utilizados teniendo en cuenta los condicionantes físicos, medioambientales y socioeconómicos propios del área de estudio.

Hidrología: cantidad de agua

Con objeto de determinar los parámetros de presión y estado, se ha calculado la disponibilidad de agua (superficial + subterránea) per cápita tanto para el periodo de estudio (2006-2010) como para el promedio histórico (1996-2010). Los caudales de escorrentía total se han obtenido a partir de los ráster disponibles en el Sistema Integrado de Información del Agua (SIA), perteneciente al Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España (Magrama, 2013). La población asociada con cada una de las subcuencas se ha determinado mediante los datos de evolución poblacional a escala municipal disponibles en el Instituto

• ISSN 2007-2422

Cuadro 4. Descripción de los parámetros de respuesta, nivel y puntuación.

Indicador	Parámetros de respuesta	Nivel	Puntuación
(*H*) hidrología	Evolución en la eficiencia de la utilización de agua en la cuenca durante el periodo analizado, un periodo de cinco años con respecto al periodo histórico	Muy pobre	0.00
		Pobre	0.25
		Regular	0.50
		Bueno	0.75
		Excelente	1.00
	Evolución en el tratamiento/eliminación de aguas residuales en la cuenca durante el periodo analizado	Muy pobre	0.00
		Pobre	0.25
		Regular	0.50
		Bueno	0.75
		Excelente	1.00
(*E*) ambiente	Evolución de áreas para la conservación de cuencas (áreas protegidas y BMP) durante el periodo	$\Delta \leq -10\%$	0.00
		$-10\% < \Delta \leq 0\%$	0.25
		$0\% < \Delta \leq +10\%$	0.50
		$+10\% < \Delta \leq +20\%$	0.75
		$\Delta > +20\%$	1.00
(*L*) vida	Variación del IDH en la cuenca durante el periodo (ponderado)	$\Delta \leq -10\%$	0.00
		$-10\% < \Delta \leq 0\%$	0.25
		$0\% < \Delta \leq +10\%$	0.50
		$+10\% < \Delta \leq +20\%$	0.75
		$\Delta > +20\%$	1.00
(*P*) política	Evolución de los gastos en GIRH (legal y organizacional) en la cuenca durante el periodo	$\Delta \leq -10\%$	0.00
		$-10\% < \Delta \leq 0\%$	0.25
		$0\% < \Delta \leq +10\%$	0.50
		$+10\% < \Delta \leq +20\%$	0.75
		$\Delta > +20\%$	1.00

Nacional de Estadística (INE, 2014). Para el caso de municipios cuya superficie formaba parte de varias subcuencas, el criterio seguido ha sido el de asignar la población del mismo a la subcuenca donde se situaba geográficamente el núcleo principal de población de dicho municipio.

En relación con los parámetros de respuesta, Chaves y Alipaz (2007) sugieren la evaluación de las mejoras respecto al uso eficiente de los recursos hídricos. En este sentido, y teniendo en cuenta los antecedentes mencionados en la descripción del área de estudio, la eficiencia en el uso de los recursos hídricos naturales de la cuenca se caracteriza por ser muy alta y constante en los últimos 30 años (Grindlay, Zamorano, Rodríguez, Molero, & Urrea, 2011), por lo que se ha decidido analizar este parámetro desde un punto de vista más cuantitativo, calculando por subcuencas los recursos hídricos no convencionales obtenidos gracias a la reutilización de aguas residuales (*R*), la desalación (*D*) y los trasvases procedentes de cuencas cercanas (*T*), asignando la puntuación en función del porcentaje de recurso hídrico no convencional conseguido respecto a la disponibilidad natural de agua per cápita (cuadro 5).

Hidrología: calidad del agua

Los parámetros de presión y estado se han calculado a partir de los datos disponibles de demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días (DBO_5) en las estaciones de control de calidad de las aguas que gestiona la Confederación

ISSN 2007-2422

Cuadro 5. Parámetros de respuesta modificados para el indicador hidrología-cantidad.

Indicador	Parámetros de respuesta	Nivel	Puntuación
(*H*) hidrología	Evolución de la disponibilidad per cápita de agua procedente de recursos **no** convencionales en el periodo estudiado	No se crean recursos **no** convencionales	0.00
		$0\% \leq \Delta < +5\%$	0.25
		$+5\% \leq \Delta < +10\%$	0.50
		$+10\% \leq \Delta < +20\%$	0.75
		$\Delta > +20\%$	1.00

Hidrográfica del Segura (CHS), organismo encargado de la gestión de la cuenca. En cuanto a las mejoras en el tratamiento de las aguas residuales, se ha seguido el criterio utilizado por Preciado-Jiménez *et al*. (2013), evaluando el número de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) disponible en cada una de las subcuencas. Además, se ha tenido en cuenta el volumen de aguas residuales tratado en cada subcuenca. Como consecuencia del desarrollo del Plan General de Saneamiento y Depuración de la Región de Murcia (BORM, 2003), zona que ocupa un 61.42% del total de la cuenca, se ha mejorado el nivel de depuración de las aguas añadiendo tratamientos terciarios a las depuradoras existentes y sustituyendo técnicas de depuración mediante lagunaje por otros sistemas más eficaces. Esto implica que en algunos casos se ha reducido el número de EDAR o el volumen de aguas tratado, sin que esto signifique un empeoramiento, pues lo que se ha conseguido es mejorar la calidad de las aguas tratadas con vistas a su posterior reutilización. Por todo ello, el criterio que se ha seguido es el de establecer un nivel medio (0.5) para todas las subcuencas, elevando la puntuación en función de la evolución del número de EDAR disponible y del volumen tratado.

Medio ambiente

El Índice de Presión Ambiental o Environment Pressure Index (EPI) se calcula como la variación media a lo largo del periodo de estudio tanto de la superficie de la cuenca, cuyo uso es agropecuario, como de la población residente en dicha cuenca. Estas variaciones se han obtenido para cada una de las subcuencas a partir de los datos de población del INE, y de los mapas de usos del suelo obtenidos en la cuenca del Segura mediante teledetección por Alonso-Sarría, Gomariz-Castillo y Cánovas-García (2010). Estos últimos datos también han servido para determinar el porcentaje de cada una de las subcuencas con vegetación natural. En cuanto al parámetro de respuesta, se han usado los datos disponibles de la fundación EUROPARC-España (EUROPARC, 2014).

Vida

Se ha partido de los índices de desarrollo humano (IDH) publicados por el Instituto Valenciano de Investigaciones Económicas (Herrero, Soler, & Villar, 2012). Tales índices están calculados a escala provincial, por lo que para obtener los indicadores relativos a cada subcuenca, se ha calculado una media ponderada en función del origen poblacional de cada una de las subcuencas.

Política

El indicador de presión asociado con este parámetro es el índice de desarrollo humano relativo a la educación (IDH-educación), el cual se ha determinado de forma análoga a los indicadores de vida mencionados antes. Para el análisis de la respuesta política se han empleado los datos facilitados por el organismo encargado de la gestión de la cuenca (CHS) en cuanto a inversiones realizadas para la gestión

• ISSN 2007-2422

de los recursos hídricos de la cuenca durante el periodo de estudio.

Respecto a la capacidad institucional de la cuenca, el WSI utiliza una calificación cuantitativa que varía desde pobre (0.0) hasta excelente (1.0), admitiéndose que si existen unas leyes adecuadas en materia de gestión de recursos hídricos, pero que todavía no han sido implementadas o reguladas, se podría asignar un puntuación intermedia (0.5). En este caso de estudio, se va a partir del nivel intermedio para toda la cuenca, incrementando la puntuación en función de la capacidad institucional y el nivel de participación pública. Para ello, se analizan las reuniones entre los distintos sectores implicados, el número de objetivos tratados en dichas reuniones y la participación en las mismas de los agentes implicados en el proceso.

Resultados y discusión

Hidrología: cantidad de agua

Las condiciones climáticas semiáridas de la cuenca del Segura quedan demostradas al analizar la disponibilidad anual de agua per cápita para cada una de las subcuencas (cuadro 6). La mayoría de las subcuencas cuenta con una disponibilidad hídrica inferior a los 500 m^3/hab. año, lo que a efectos del índice de estrés hídrico (Falkenmark, Lundquist, & Widstrand, 1989) se podría catalogar como absoluta escasez. De ahí que los indicadores de estado presenten puntuaciones tan bajas. La disponibilidad de agua es mayor solamente en aquellas subcuencas situadas en la cabecera de la cuenca (Sierra del Segura, Corral Rubio y Río Mundo), como consecuencia de su menor densidad poblacional combinada con un régimen pluviométrico más alto. En cuanto a las subcuencas con una disponibilidad inferior a los 100 m^3/hab. año, destaca la Vega Media y el Sur de Alicante con 18 y 58 m^3/hab. año, respectivamente. En el caso de la Vega Media, dicho valor se justifica como consecuencia de que la ciudad más poblada de la cuenca del Segura (alrededor de 450 000 habitantes), Murcia, se ubica en dicha subcuenca. Por otro lado, el Sur de Alicante es una subcuenca costera donde la densidad de población también es muy alta, de ahí su baja disponibilidad. En relación con los indicadores de presión, las disponibilidades durante el periodo de estudio son en general superiores al periodo histórico, lo que justifica las altas puntuaciones obtenidas.

Cuadro 6. Valores obtenidos de los parámetros de presión y estado para el indicador hidrología-cantidad.

Subcuenca	Disponibilidad per cápita de agua (m^3/hab año) (1996-2010)	Disponibilidad per cápita de agua (m^3/hab año) (2006-2010)	Δ (%)	Puntuación presión	Puntuación estado
Río Mundo	2 054	2 532	23.27	1	0.25
Corral Rubio	1 811	1 897	4.73	0.75	0.25
Yecla	360	390	8.28	0.75	0
Ramblas del Noroeste	474	571	20.50	1	0
Sur de Alicante	58	53	-8.62	0.50	0
Vega Media	18	19	3.78	0.75	0
Mar Menor	106	90	-15.42	0.25	0
Guadalentín	469	580	23.68	1	0
Sur de Murcia	183	184	0.63	0.75	0
Almería	623	737	18.44	1	0
Mula	1 134	1 134	0.04	0.75	0
Vega Alta	235	271	15.29	1	0
Noroeste de Murcia	1 453	1 746	20.20	1	0
Sierra del Segura	25 413	33 712	32.66	1	1

ISSN 2007-2422

En el cuadro 7 se muestran los parámetros de respuesta calculados a partir de los recursos no convencionales generados. Cabe destacar que en todas y cada una de las subcuencas analizadas se están reutilizando las aguas residuales depuradas. Los mayores esfuerzos en cuanto a desalación y trasvases se están produciendo en aquellos lugares cuya disponibilidad de agua era menor, llegando en muchos casos a superar mediante este tipo de recursos la disponibilidad de agua natural.

Hidrología: calidad de agua

Se ha analizado la variación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5, en mg/l) tanto para el periodo estudiado (2006-2010) como para el promedio histórico, obteniendo los resultados mostrados en el cuadro 8. Se observa cómo en una gran parte de las subcuencas la concentración ha descendido de forma importante, lo que da a lugar a puntuaciones de presión altas. Sin embargo, los registros analizados durante el periodo histórico muestran valores de concentración muy altos (puntuaciones bajas del parámetro de estado), lo que demuestra que la actuación de la CHS en materia de control de vertidos como consecuencia de la implantación de la DMA está consiguiendo resultados muy beneficiosos.

La reutilización de aguas residuales es uno de los principales objetivos de los organismos encargados de la gestión de los recursos hídricos de la cuenca del Segura. De acuerdo con los resultados presentados en el cuadro 7, todas las subcuencas están empleando aguas reutilizadas como una de las formas disponibles para paliar el déficit hídrico de la cuenca. Para conseguir aumentar los volúmenes reutilizados, se han hecho grandes inversiones en los últimos años en materia de depuración de aguas residuales. Dichas inversiones se reflejan en el número de EDAR y en el volumen de aguas residuales tratadas en la cuenca (cuadro 9), que en la mayoría de los casos ha aumentado de forma considerable, obteniéndose niveles de respuesta muy altos.

Medio ambiente

En el cuadro 10 se muestra el EPI calculado para cada una de las subcuencas de la cuenca

Cuadro 7. Valores obtenidos de los parámetros de respuesta para el indicador hidrología-cantidad.

Subcuenca	Población media anual (2006-2010)	Recursos no convencionales					Δ (%)	Puntuación respuesta
		T (hm^3)	*R* (hm^3)	*D* (hm^3)	Total (hm^3)	Per cápita (m^3/hab año)		
Río Mundo	50 700		2.23		2.23	44	1.74	0.25
Corral Rubio	2 505		0.06		0.06	25	1.32	0.25
Yecla	36 907		1.78		1.78	48	12.31	0.75
Ramblas del Noroeste	51 806	0.96	6.37		7.33	142	24.87	1
Sur de Alicante	380 764	47.46	19.34	53	119.80	315	594.34	1
Vega Media	495 328	28.69	4.05		32.74	66	347.37	1
Mar Menor	361 745	49.01	19.73	92	158.74	439	487.78	1
Guadalentín	171 063	25.26	6.60		31.86	186	32.07	1
Sur de Murcia	67 522	3.71	2.24	61.50	67.45	999	542.93	1
Almería	8 014	3.87	0.29	7	11.16	139	18.86	0.75
Mula	24 264	2.69	1.10		3.79	156	13.76	0.75
Vega Alta	174 926	22.83	11.42		34.25	196	72.32	1
Noroeste de Murcia	73 166	4.02	3.08		7.10	97	5.56	0.50
Sierra del Segura	17 774	0.15	0.84		0.99	55	0.16	0.25

• ISSN 2007-2422

Cuadro 8. Valores obtenidos de los parámetros de presión y estado para el indicador hidrología-calidad.

Subcuenca	Concentración DBO_5 (mg/l) (1979-2010)	Concentración DBO_5 (mg/l) (2006-2010)	Δ (%)	Puntuación presión	Puntuación estado
Río Mundo	1.43	0.69	-51.75	1	0.75
Corral Rubio	13.33	13.33	0.00	0.75	0
Yecla	23.98	6.78	-71.73	1	0
Ramblas del Noroeste	3.76	3.76	0.00	0.75	0.50
Sur de Alicante	18.37	2.75	-85.03	1	0
Vega Media	38.97	3.02	-92.25	1	0
Mar Menor	3.81	3.81	0.00	0.75	0.50
Guadalentín	181.10	47.44	-73.80	1	0
Sur de Murcia	0.00	0.00	0.00	0.75	1
Almería	23.98	6.78	-71.73	1	0
Mula	14.84	3.18	-78.57	1	0
Vega Alta	5.17	0.80	-84.53	1	0.25
Noroeste de Murcia	5.98	2.33	-61.04	1	0.25
Sierra del Segura	1.02	0.21	-79.41	1	0.75

Cuadro 9. Valores obtenidos de los parámetros de respuesta para el indicador hidrología-calidad.

Subcuenca	Núm. de EDAR (2006)	Volumen (hm^3) (2006)	Núm. de EDAR (2010)	Volumen (hm^3) (2010)	ΔEDAR (%)	Δvol. (%)	Puntuación respuesta
Río Mundo	6	4.29	15	4.70	+150.00	+9.56	1
Corral Rubio	0	0	3	0.15			1
Yecla	3	2.03	2	1.79	-33.33	-11.82	0.50
Ramblas del Noroeste	6	5.13	17	6.46	+183.33	+25.93	1
Sur de Alicante	30	26.33	32	24.88	+6.67	-5.51	0.75
Vega Media	9	39.47	7	44.60	-22.22	+13.00	0.75
Mar Menor	23	27.76	27	26.02	+17.39	-6.27	0.75
Guadalentín	14	7.35	13	7.00	-7.14	-4.76	0.50
Sur de Murcia	3	3.91	3	4.17	0.00	+6.65	0.75
Almería	1	0.31	2	0.36	+100.00	+16.13	1
Mula	3	3.05	6	3.08	+100.00	+0.98	1
Vega Alta	10	13.95	11	15.13	+10.00	+8.46	1
Noroeste de Murcia	7	3.21	11	5.19	+57.14	+61.68	1
Sierra del Segura	7	2.20	8	1.67	+14.29	-24.09	0.75

del Segura. Analizando dicho cuadro, se observa cómo las superficies destinadas a los usos agropecuarios han ido disminuyendo a lo largo del periodo de estudio. El motivo fundamental de dicha reducción es el abandono de las labores agrícolas como consecuencia de la escasez hídrica. Solamente la Sierra del Segura, que se caracteriza por ser la subcuenca con una mayor disponibilidad hídrica de la cuenca (cuadro 6), y las subcuencas del Sur de Murcia y Almería, como consecuencia de las aportaciones hídricas recibidas procedentes principalmente de la desalación (cuadro 7), no siguen esta tendencia. En términos de población, prácticamente en todas

ISSN 2007-2422

Cuadro 10. Valores obtenidos de los parámetros de presión para el indicador medio ambiente.

Subcuenca	Superficie agropecuaria (km²)			Población (habitantes)				Puntuación presión
	2006	2010	Δ (%)	2006	2010	Δ (%)	EPI	
Río Mundo	1 020	1 004	-1.57	50 146	51 067	+1.84	+0.14	0.75
Corral Rubio	234	198	-15.38	2 545	2 403	-5.58	-10.48	1
Yecla	553	502	-9.22	36 284	37 246	+2.65	-3.29	1
Ramblas del Noroeste	799	706	-11.64	49 458	53 744	+8.67	-1.49	1
Sur de Alicante	612	572	-6.54	354 153	398 132	+12.42	+2.94	0.75
Vega Media	192	173	-9.90	479 584	509 179	+6.17	-1.87	1
Mar Menor	1 101	1 166	+5.90	348 893	374 466	+7.33	+6.62	0.50
Guadalentín	1 668	1 579	-5.34	167 811	174 810	+4.17	-0.59	1
Sur de Murcia	205	352	+71.71	63 291	70 364	+11.18	+41.45	0
Almería	210	245	+16.67	7 537	8 429	+11.83	+14.25	0.25
Mula	351	338	-3.70	23 530	24 640	+4.72	+0.51	0.75
Vega Alta	608	555	-8.72	166 301	181 529	+9.16	+0.22	0.75
Noroeste de Murcia	798	771	-3.38	71 045	74 467	+4.82	+0.72	0.75
Sierra del Segura	391	599	+53.20	18 086	17 368	-3.97	+24.62	0

las subcuencas se ha producido un incremento que varía entre un 0 y un 10%.

En cuanto a la superficie de vegetación natural de la cuenca (cuadro 11), los parámetros de presión se podrían calificar como aceptables, teniendo en cuenta que la única subcuenca con un porcentaje inferior a 10%, y por lo tanto muy antropizada, es la subcuenca de Corral Rubio, destacando en sentido contrario la Sierra del Segura. Esta subcuenca es, a su vez, la que presenta una mayor superficie de espacios naturales protegidos (ENP). La aprobación en España de la mayor parte de los ENP se produjo a lo largo de la década de 1990 (Vacas-Guerrero, 2005), de ahí que durante el periodo analizado apenas existan variaciones en ese sentido.

Vida

En el cuadro 12 se pueden observar los parámetros de presión. El índice de desarrollo humano asociado con la renta (IDH-renta) ha descendido a lo largo del periodo de estudio en prácticamente todas las subcuencas analizadas. Dicho descenso varía entre 1 y 1.5%, y se justifica de manera fundamental por el periodo de crisis económica en el que se encuentra España. La subcuenca asociada con la provincia de Almería es la única donde se produce una mejora en dicho índice (+0.4%).

Respecto a los parámetros de estado y respuesta (cuadro 13), todas las provincias concernientes al área de estudio presentan unos índices de desarrollo humano (IDH) y una evolución a lo largo del área de estudio muy similares. El rango de variación se sitúa entre 0.823 y 0.853, mientras que el incremento en el IDH varía entre 0.84 y 2.87%. Estos resultados demuestran la homogeneidad socioeconómica del área de estudio a pesar de la gran superficie analizada.

Política

Análogo a los resultados anteriores relativos al IDH, el índice de desarrollo humano asociado con la educación (IDH-educación) varía muy poco a lo largo del área de estudio y presenta una ligera tendencia al alza, tal y como se observa en el cuadro 14.

El cumplimiento de los procesos de participación pública determinados por la DMA ha provocado que, de acuerdo con las distintas actas de reuniones consultadas, más de 50%

• ISSN 2007-2422

Cuadro 11. Valores obtenidos de los parámetros de estado y respuesta para el indicador medio ambiente.

Subcuenca	Superficie (km^2)	*Av* (%) (2006-2010)	Puntuación estado	ENP (2006) (km^2)	ENP (2010) (km^2)	Δ (%)	Puntuación respuesta
Río Mundo	2 414	46.86	1	74.14	77.09	+3.98	0.50
Corral Rubio	272	5.45	0.25	3.42	3.42	0.00	0.25
Yecla	843	23.65	0.50	8.99	8.99	0.00	0.25
Ramblas del Noroeste	1 497	32.11	0.75	115.20	116.16	+0.83	0.50
Sur de Alicante	1 016	15.16	0.50	143.25	145.29	+1.42	0.50
Vega Media	412	24.73	0.50	31.17	31.17	0.00	0.25
Mar Menor	1 602	17.08	0.50	105.99	105.99	0.00	0.25
Guadalentín	3 343	37.55	0.75	410.96	411.08	+0.03	0.50
Sur de Murcia	690	49.13	1	45.30	45.30	0.00	0.25
Almería	452	42.43	1	0.67	0.67	0.00	0.25
Mula	708	36.25	0.75	44.72	44.72	0.00	0.25
Vega Alta	1 389	41.13	1	41.54	41.54	0.00	0.25
Noroeste de Murcia	1 688	41.52	1	0.08	0.08	0.00	0.25
Sierra del Segura	2 605	75.24	1	737.74	737.74	0.00	0.25

Cuadro 12. Valores obtenidos de los parámetros de presión para el indicador vida.

Subcuenca	Provincia	Población		IDH-renta		IDH-renta ponderado			Puntuación presión
		2006	2010	2006	2010	2006	2010	Δ (%)	
Río Mundo	Albacete	50 146	51 067	0.768	0.759	0.768	0.759	-1.17	0.50
Corral Rubio	Albacete	2 545	2 403	0.768	0.759	0.768	0.759	-1.17	0.50
Yecla	Murcia	33 964	34 945	0.789	0.779	0.788	0.778	-1.27	0.50
	Albacete	2 320	2 301	0.768	0.759				
Ramblas del Noroeste	Murcia	39 122	42 413	0.789	0.779	0.790	0.780	-1.27	0.50
	Alicante	10 336	11 331	0.794	0.782				
Sur de Alicante	Alicante	354 153	398 132	0.794	0.782	0.794	0.782	-1.51	0.50
Vega Media	Murcia	479 584	509 179	0.789	0.779	0.789	0.779	-1.27	0.50
Mar Menor	Murcia	329 315	351 911	0.789	0.779	0.789	0.779	-1.27	0.50
	Alicante	19 578	22 555	0.794	0.782				
Guadalentín	Murcia	155 244	162 083	0.789	0.779	0.790	0.781	-1.14	0.50
	Almería	12 567	12 727	0.800	0.803				
Sur de Murcia	Murcia	63 291	70 364	0.789	0.779	0.789	0.779	-1.27	0.50
Almería	Almería	7 537	8 429	0.800	0.803	0.800	0.803	+0.38	0.75
Mula	Murcia	23 530	24 640	0.789	0.779	0.789	0.779	-1.27	0.50
Vega Alta	Murcia	166 301	181 529	0.789	0.779	0.789	0.779	-1.27	0.50
Noroeste de Murcia	Murcia	71 045	74 467	0.789	0.779	0.789	0.779	-1.27	0.50
Sierra del Segura	Albacete	14 046	13 666	0.768	0.759	0.764	0.756	-1.05	0.50
	Jaén	4 040	3 702	0.752	0.748				

ISSN 2007-2422

Cuadro 13. Valores obtenidos de los parámetros de estado y respuesta para el indicador vida.

Subcuenca	Provincia	IDH 2006	IDH 2010	IDH ponderado 2006	IDH ponderado 2010	Δ (%)	Puntuación estado	Puntuación respuesta
Río Mundo	Albacete	0.826	0.837	0.826	0.837	+1.33	0.75	0.50
Corral Rubio	Albacete	0.826	0.837	0.826	0.837	+1.33	0.75	0.50
Yecla	Murcia	0.838	0.845	0.837	0.845	+0.96	0.75	0.50
	Albacete	0.826	0.837					
Ramblas del Noroeste	Murcia	0.838	0.845	0.838	0.847	+1.07	0.75	0.50
	Alicante	0.839	0.853					
Sur de Alicante	Alicante	0.839	0.853	0.839	0.853	+1.67	0.75	0.50
Vega Media	Murcia	0.838	0.845	0.838	0.845	+0.84	0.75	0.50
Mar Menor	Murcia	0.838	0.845	0.838	0.845	+0.84	0.75	0.50
	Alicante	0.839	0.853					
Guadalentín	Murcia	0.838	0.845	0.837	0.845	+0.96	0.75	0.50
	Almería	0.823	0.847					
Sur de Murcia	Murcia	0.838	0.845	0.838	0.845	+0.84	0.75	0.50
Almería	Almería	0.823	0.847	0.823	0.847	+2.92	0.75	0.50
Mula	Murcia	0.838	0.845	0.838	0.845	+0.84	0.75	0.50
Vega Alta	Murcia	0.838	0.845	0.838	0.845	+0.84	0.75	0.50
Noroeste de Murcia	Murcia	0.838	0.845	0.838	0.845	+0.84	0.75	0.50
Sierra del Segura	Albacete	0.826	0.837	0.824	0.837	+1.58	0.75	0.50
	Jaén	0.820	0.837					

Cuadro 14. Valores obtenidos de los parámetros de presión para el indicador política.

Subcuenca	Provincia	IDH-educación 2006	IDH-educación 2010	IDH-educación ponderado 2006	IDH-educación ponderado 2010	Δ (%)	Puntuación presión
Río Mundo	Albacete	0.753	0.781	0.753	0.781	+3.74	0.75
Corral Rubio	Albacete	0.753	0.781	0.753	0.781	+3.74	0.75
Yecla	Murcia	0.782	0.797	0.780	0.796	+2.04	0.75
	Albacete	0.753	0.781				
Ramblas del Noroeste	Murcia	0.782	0.797	0.780	0.799	+2.45	0.75
	Alicante	0.772	0.806				
Sur de Alicante	Alicante	0.772	0.806	0.772	0.806	+4.46	0.75
Vega Media	Murcia	0.782	0.797	0.782	0.797	+1.92	0.75
Mar Menor	Murcia	0.782	0.797	0.781	0.798	+2.06	0.75
	Alicante	0.772	0.806				
Guadalentín	Murcia	0.782	0.797	0.779	0.796	+2.19	0.75
	Almería	0.741	0.783				
Sur de Murcia	Murcia	0.782	0.797	0.782	0.797	+1.92	0.75
Almería	Almería	0.741	0.783	0.741	0.783	+5.72	0.75
Mula	Murcia	0.782	0.797	0.782	0.797	+1.92	0.75
Vega Alta	Murcia	0.782	0.797	0.782	0.797	+1.92	0.75
Noroeste de Murcia	Murcia	0.782	0.797	0.782	0.797	+1.92	0.75
Sierra del Segura	Albacete	0.753	0.781	0.756	0.787	+4.04	0.75
	Jaén	0.767	0.807				

• ISSN 2007-2422

de los organismos, administraciones y entidades convocadas acudan a las distintas mesas territoriales organizadas durante el periodo de estudio. Esto permite considerar la capacidad legal e institucional como buena (puntuación 0.75). Además, incidiendo en los objetivos tratados durante dichas mesas territoriales, permite considerar alguna de las subcuencas como excelente, tal y como se observa en el cuadro 15.

La inversión en gestión integrada de los recursos hídricos en la cuenca (cuadro 16) ha aumentado a lo largo del periodo de estudio en todas las subcuencas analizadas. Tal y como se podría esperar, los menores incrementos se

Cuadro 15. Valores obtenidos de los parámetros de estado para el indicador de política.

Subcuenca	Objetivos tratados en las mesas territoriales					Puntuación estado
	Ambientales	Uso racional	Extremos	Gobernanza	Total	
Río Mundo	4	0	1	0	5	0.75
Corral Rubio	4	0	0	0	4	0.75
Yecla	1	1	0	1	3	0.75
Ramblas del Noroeste	1	1	0	1	3	0.75
Sur de Alicante	11	2	0	0	13	1
Vega Media	4	1	0	0	5	0.75
Mar Menor	5	1	0	0	6	1
Guadalentín	5	2	0	0	7	1
Sur de Murcia	5	2	0	0	7	1
Almería	5	2	0	0	7	1
Mula	4	1	0	0	5	0.75
Vega Alta	11	2	0	0	13	1
Noroeste de Murcia	4	1	0	0	5	0.75
Sierra del Segura	4	0	1	0	5	0.75

Cuadro 16. Valores obtenidos de los parámetros de respuesta para el indicador política.

Subcuenca	Población		Inversión (miles €)		Δ (%)	Puntuación respuesta
	2006	2010	2006	2010		
Río Mundo	50 146	51 067	434	445	+2.51	0.50
Corral Rubio	2 545	2 403	1 202	1 307	+8.71	0.50
Yecla	36 284	37 246	870	953	+9.58	0.50
Ramblas del Noroeste	49 458	53 744	1 186	1 376	+16.00	0.75
Sur de Alicante	354 153	398 132	8 492	10 191	+20.01	1
Vega Media	479 584	509 179	11 500	13 034	+13.34	0.75
Mar Menor	348 893	374 466	8 366	9 586	+14.58	0.75
Guadalentín	167 811	174 810	4 024	4 475	+11.21	0.75
Sur de Murcia	63 291	70 364	1 518	1 801	+18.68	0.75
Almería	7 537	8 429	181	216	+19.39	0.75
Mula	23 530	24 640	564	631	+11.79	0.75
Vega Alta	166 301	181 529	3 988	4 647	+16.53	0.75
Noroeste de Murcia	71 045	74 467	1 704	1 906	+11.89	0.75
Sierra del Segura	18 086	17 368	434	445	+2.51	0.50

ISSN 2007-2422

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 2, marzo-abril de 2016, pp. 67-84

• ISSN 2007-2422

Cuadro 17. WSI en la cuenca del Segura.

Subcuenca	Presión	Estado	Respuesta	Hidrología cantidad	Presión	Estado	Respuesta	Hidrología calidad	Presión	Estado	Respuesta	Medio-ambiente	Presión	Estado	Respuesta	Vida	Presión	Estado	Respuesta	Política	WSI
Río Mundo	1	0.25	0.25	0.50	1	0.75	1	0.92	0.75	1	0.50	0.75	0.50	0.75	0.50	0.58	0.75	0.75	0.50	0.67	0.68
Corral Rubio	0.75	0.25	0.25	0.42	0.75	0	1	0.58	1	0.25	0.25	0.50	0.50	0.75	0.50	0.58	0.75	0.75	0.50	0.67	0.56
Yecla	0.75	0	0.75	0.50	1	0	0.50	0.50	1	0.50	0.25	0.58	0.50	0.75	0.50	0.58	0.75	0.75	0.50	0.67	0.58
Ramblas del Noroeste	1	0	1	0.67	0.75	0.50	1	0.75	1	0.75	0.50	0.75	0.50	0.75	0.50	0.58	0.75	0.75	0.75	0.75	0.70
Sur de Alicante	0.50	0	1	0.50	1	0	0.75	0.58	0.75	0.50	0.50	0.58	0.50	0.75	0.50	0.58	0.75	1	1	0.92	0.66
Vega Media	0.75	0	1	0.58	1	0	0.75	0.58	1	0.50	0.25	0.58	0.50	0.75	0.50	0.58	0.75	0.75	0.75	0.75	0.63
Mar Menor	0.25	0	1	0.42	0.75	0.50	0.75	0.67	0.50	0.50	0.25	0.42	0.50	0.75	0.50	0.58	0.75	1	0.75	0.83	0.59
Guadalentín	1	0	1	0.67	1	0	0.50	0.50	1	0.75	0.50	0.75	0.50	0.75	0.50	0.58	0.75	1	0.75	0.83	0.69
Sur de Murcia	0.75	0	1	0.58	0.75	1	0.75	0.83	0	1	0.25	0.42	0.50	0.75	0.50	0.58	0.75	1	0.75	0.83	0.64
Almería	1	0	0.75	0.58	1	0	1	0.67	0.25	1	0.25	0.50	0.75	0.75	0.50	0.67	0.75	1	0.75	0.83	0.66
Mula	0.75	0	0.75	0.50	1	0	1	0.67	0.75	0.75	0.25	0.58	0.50	0.75	0.50	0.58	0.75	0.75	0.75	0.75	0.63
Vega Alta	1	0	1	0.67	1	0.25	1	0.75	0.75	1	0.25	0.67	0.50	0.75	0.50	0.58	0.75	1	0.75	0.83	0.70
Noroeste de Murcia	1	0	0.50	0.50	1	0.25	1	0.75	0.75	1	0.25	0.67	0.50	0.75	0.50	0.58	0.75	0.75	0.75	0.75	0.66
Sierra del Segura	1	1	0.25	0.75	1	0.75	0.75	0.83	0	1	0.25	0.42	0.50	0.75	0.50	0.58	0.75	0.75	0.50	0.67	0.61
Cuenca del Segura	0.82	0.11	0.75	0.56	0.93	0.29	0.84	0.68	0.68	0.75	0.32	0.58	0.52	0.75	0.50	0.59	0.75	0.86	0.70	0.77	**0.64**

dan en las subcuencas ubicadas en la cabecera (Sierra del Segura y Río Mundo), mientras que los mayores aumentos se dan en las subcuencas costeras donde la presión hídrica es mayor (Sur de Alicante, Sur de Murcia y Almería).

En el cuadro 17 se muestra un resumen de los parámetros obtenidos para cada uno de los indicadores en las 14 subcuencas estudiadas. El WSI para cada una de las subcuencas varía entre 0.56 y 0.70, obteniéndose un WSI global para toda la cuenca del Segura de 0.64, lo que a efectos de la clasificación propuesta por Chaves y Alipaz supone un grado de sostenibilidad intermedio.

Conclusiones

La del Segura se caracteriza por ser una de las cuencas con mayor estrés hídrico de la Europa mediterránea. Las altas presiones sobre los recursos hídricos han provocado numerosos problemas de índole político, económico, social y ambiental. Con objeto de evaluar la sostenibilidad en la gestión de los recursos hídricos de la cuenca, se ha aplicado la metodología del WSI, obteniéndose resultados satisfactorios que muestran una gestión sostenible del recurso en los últimos años. Se ha obtenido un índice WSI para toda la cuenca de 0.64, lo que permite calificar el nivel de sostenibilidad como intermedio. Las mayores fortalezas se relacionaron con los indicadores políticos, mientras que las mayores debilidades observadas se relacionaron con el indicador hidrológico relativo a cantidad debido principalmente a la situación de escasez hídrica. No se observaron grandes diferencias entre las subcuencas analizadas, lo que indica cierta homogeneidad en el grado de sostenibilidad en la gestión de las mismas.

La principal aportación del trabajo presentado es la adaptación de la metodología del WSI a las condiciones climáticas de una cuenca semiárida sujeta a las obligaciones derivadas de la implantación de la DMA europea. Para ello, se han modificado los indicadores de carácter más cualitativo a las condiciones de la zona de estudio, de modo que reflejen, por un lado, los esfuerzos realizados en materia de generación de recursos no naturales y, por otro, las obligaciones derivadas de los procesos de participación pública propuestos en la DMA.

De acuerdo con las referencias consultadas, no existen antecedentes de aplicación de dicha metodología en Europa, por lo que la metodología propuesta podrá ser utilizada en numerosas cuencas mediterráneas europeas que presentan condiciones climáticas, sociales y legales muy similares a las del caso objeto de estudio.

Referencias

Alonso-Sarría, F., Gomariz-Castillo, F., & Cánovas-García, F. (2010). Análisis temporal de los cambios de usos del suelo en la cuenca del Segura mediante teledetección. Implicaciones sobre la degradación. *Rev. C. & G.*, *24*(3-4), 73-88.

BORM (6 de febrero de 2003). Resolución de 10 de enero de 2003 por la que se hace público el acuerdo del Consejo de Gobierno de la Comunidad Autónoma de Murcia de 20 de diciembre de 2002, por el que se aprueba definitivamente el Plan General de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales Urbanas de la Región de Murcia. *Boletín Oficial de la Región de Murcia*, *30*, 2147-2170.

Brundtland, G. H. (1987). *Our Common Future/World Commission on Environment and Development*. Oxford: Oxford University Press.

Catano, N., Marchand, M., Staley, S., & Wang, Y. (2009). *Development and Validation of the Watershed Sustainability Index (WSI) for the Watershed of the Reventazón River*. Cartago, Costa Rica: Comcure Report.

Chaves, H. (2009). *Desarrollo y validación del índice de sostenibilidad de cuencas para la cuenca hidrográfica del Canal de Panamá*. Informe Técnico núm. 269731. Panamá: Autoridad del Canal de Panamá.

Chaves, H., & Alipaz, S. (2007). An Integrated Indicator for Basin Hydrology, Environment, Life, and Policy: The Watershed Sustainability Index. *Journal of Water Resources Management*, *21*, 883-895.

CHS (2013). *Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura, Memoria*. Confederación Hidrográfica del Segura, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Recuperado de https://www.chsegura.es/export/descargas/planificacionydma/planificacion/docsdescarga/Memoria-PHCS-2009_2015.pdf.

Cortés, A. E., Oyarzún, R., Kretschmer, N., Chaves, H., Soto, G., Soto, M., Amézaga, J., Oyarzún, J., Rötting, T., Señoret, M., & Maturana, H. (2012). Application of the Watershed Sustainability Index to the Elqui River Basin, North-Central Chile. *Obras y Proyectos*, *12*, 57-69.

Elfithri, R. (2013). *Watershed Sustainability Index (WSI) Study for Langat River Basin, Malaysia*. Recuperado de http://conference2013.gwsp.org/uploads/media/Elfithri_Watershed_Sustainability_Index__WSI__Study_for_Langat_River_Basin__Malaysia.pdf.

EUROPARC (2014). *Fundación EUROPARC-España*. Recuperado de http://www.redeuroparc.org/index.jsp.

Falkenmark, M., Lundquist, J., & Widstrand, C. (1989). Macro-Scale Water Scarcity Requires Micro-Scale Approaches: Aspects of Vulnerability in Semi-Arid Development. *Nat. Resor. Forum*, *13*, 258-267.

Firdaus, R., Nakagoshi, N., & Idris, A. (2014). Sustainability Assessment of Humid Tropical Watershed: A Case of Batang Merao Watershed, Indonesia. *Procedia Environmental Sciences*, *20*, 722-731.

Grindlay, A. L., Zamorano, M., Rodríguez, M. I., Molero, E., & Urrea, M. A. (2011). Implementation of the European Water Framework Directive: Integration of Hydrological and Regional Planning at the Segura River Basin, Southeast Spain. *Land Use Policy*, *28*, 242-256.

Herrero, C., Soler, A., & Villar, A. (2012). *Desarrollo humano en España: 1980-2011* (54 pp.). Valencia: IVIE.

INE (2014). *Instituto Nacional de Estadística*. Recuperado de http://www.ine.es/.

Juwana, I., Muttil, N., & Perera, B. J. C. (2012). Indicator-Based Water Sustainability Assessment-A Review. *Science of the Total Environment*, *438*, 357-371.

Magrama (2013). El Sistema Integrado de Información del Agua. Recuperado de http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/sia-/.

Martínez-Fernández, J., Esteve-Selma, M. A., & Calvo-Sendín, J. F. (2000). Environmental and Socioeconomic Interactions in the Evolution of Traditional Irrigated Lands: A Dynamic System Model. *Human Ecology*, *28*, 279-299.

OCDE (2003). *OCDE Environmental Indicators: Development, Measurement and Use. Reference Paper* (p. 50). Paris: OCDE.

Preciado-Jiménez, M., Aparicio, J., Güitrón-de-los-Reyes, A., & Hidalgo-Toledo, J. A. (September-October, 2013). Watershed Sustainability Index for the Lerma-Chapala basin. *Water Technology and Sciences*, 4(3), 93-113.

Rapport, D. J., & Friend, A. M. (1979). *Towards a Comprehensive Framework for Environmental Statistics: A Stress-Response Approach* (pp. 11-510). Ottawa, Canada: Minister of Supply and Services, Statistics Canada Catalogue.

UNESCO (2005). *Hydrology for the Environment, Life and Policy-HELP (Brochure)* (p. 20.). Paris: UNESCO.

Vacas-Guerrero, T. (2005). Los espacios naturales protegidos: figuras de protección en España. *Actas del XIX Congreso de Geógrafos Españoles: Espacios Públicos, Espacios Privados*. Cantabria, España: Asociación de Geógrafos Españoles, Universidad de Cantabria.

Dirección institucional de los autores

Dr. Javier Senent-Aparicio
Dr. Julio Pérez-Sánchez
M.C. Alicia María Bielsa-Artero

Universidad Católica San Antonio de Murcia (UCAM)
Departamento de Ingeniería Civil
Avenida de los Jerónimos s/n
30107 Guadalupe, Murcia, España
jsenent@ucam.edu
jperez058@ucam.edu
ambielsa@ucam.edu

Haga clic aquí para escribir al autor

• ISSN 2007-2422

Metodología para la delimitación y caracterización de humedales en escalas 1:50 000 y 1:20 000

• Jorge Brena* • Cervando Castillo • Ana Wagner •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
*Autor de correspondencia

Resumen

Brena, J., Castillo, C., & Wagner, A. (marzo-abril, 2016). Metodología para la delimitación y caracterización de humedales en escalas 1:50 000 y 1:20 000. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *7*(2), 85-98.

Se analiza la situación retrospectiva y actual de los humedales localizados en la zona de la Vertiente Pacífica del estado de Chiapas, México, para lo cual se aplicaron técnicas de percepción remota empleando imágenes satelitales tomadas en 1986, 2004 y 2010, que junto con cartografía temática digital procesada en un sistema de información geográfica permitió la evaluación prospectiva del comportamiento tendencial de los humedales al año 2030. Como resultado, se obtuvo una metodología para delimitar humedales en escalas 1:50 000 y 1:20 000, los mapas de uso de suelo y vegetación de las tres cuencas que integran la zona de estudio y un mapa tendencial para el año 2030. Del análisis temporal de las coberturas, su localización y la morfología del relieve, se detectaron problemas y amenazas, elaborándose un mapa de áreas críticas para orientar acciones de recuperación ambiental, reducir la erosión y el riesgo de deslizamientos que amenazan a localidades específicas. Se concluye que el diagnóstico de salud ambiental de un humedal refleja los efectos de las acciones hechas en las diferentes partes de una cuenca. La información obtenida es básica para evaluar estrategias sectoriales y desarrollar un plan de manejo integral de los recursos que promueva el crecimiento económico de la región y su aprovechamiento sustentable.

Palabras clave: humedales, percepción remota, recursos naturales.

Abstract

(March-April, 2016). Methodology to Delimit and Characterize Wetlands at Scales of 1:50 000 and 1:20 000. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 7(2), 85-98.*

This work analyzes the past and current state of the wetlands located in the study area, on the Pacific slope of the state of Chiapas, Mexico. To this end, remote sensing techniques were applied using satellite images taken in 1986, 2004 and 2010. This was used along with digital thematic mapping processed with a geographic information system to prospectively evaluate the trends in the wetlands' behavior through the year 2030. As result, a methodology was obtained to delimit wetlands at scales of 1:50 000 and 1:20 000. Land use and vegetation maps for the three basins in the study area were used as well as a trend map for the year 2030. The temporal analysis of vegetation cover, location and topographical morphology detected problems and threats. A map of critical areas was generated to inform environmental recovery actions and reduce erosion and the risk of landslides which threatens specific localities. It is concluded that a diagnostic of the environmental health of a wetland reflects the effects of the actions taken in different parts of a basin. The information obtained is crucial to evaluate sectoral strategies and develop an integral resource management plan that promotes the economic growth of the region as well as its sustainable use.

***Keywords**: Wetlands, integrated water management, remote sensing.*

Recibido: 27/03/2015
Aceptado: 04/11/2015

Introducción

La Convención de Ramsar definió los humedales como "extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros" (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2010b). Esta definición abarca tanto humedales continentales (lagos, ríos y marismas) como humedales costeros (bajos mareales, manglares, marismas de agua salada y arrecifes de coral).

Los humedales son algunas de las áreas de biodiversidad más importantes del mundo y constituyen el hábitat fundamental de numerosas especies; además, son proveedores particularmente importantes de servicios ecosistémicos relacionados con el agua, debido a que regulan la cantidad y purifican las aguas superficiales, favorecen la recarga de las aguas subterráneas, y en algunos casos contribuyen a regular las avenidas y mitigar el impacto de las tormentas, incrementando la resiliencia ante los torrentes; además de desempeñar papeles importantes en reciclamiento de nutrientes, cambio climático, y seguridad alimentaria y laboral.

La pérdida de humedales en el mundo se ha estimado en un 50% de la superficie original en los últimos 100 años. Esto ocurrió principalmente en las regiones templadas del hemisferio norte durante la primera mitad del siglo XIX. No obstante, alrededor de 1950, humedales tropicales y subtropicales han ido desapareciendo con rápidez, en particular los bosques de pantano y manglares (Stolk, Verweij, Stuip, Baker, & Oosterberg, 2006). Respecto a los manglares, de 1980 a 2007 se perdió 20% de su extensión total (3.6 millones de hectáreas) en el orbe; la tasa de reducción de la superficie de manglares en México se estimó en 1.5% anual (13 000 ha/año) en el periodo de 2000 a 2005 (FAO, 2007). La degradación de los humedales que quedan puede producir pérdidas de biodiversidad, cambios en las funciones ecológicas y en los flujos de los servicios ecosistémicos, con impactos posteriores en la salud, en los medios de subsistencia y bienestar de las comunidades, y en la actividad económica.

La superficie de humedales en México es de 10 033 623 ha (González, 2012). Muchos de estos ecosistemas enfrentan un grave deterioro, sobreexplotación y contaminación de sus aguas, la desecación para la construcción de infraestructura urbana y turística, o su conversión a usos productivos (agrícolas, acuícolas y pecuarios). Para revertir la pérdida de humedales del país es necesario implementar políticas de conservación sustentadas en inventarios actualizados, que apoyen el establecimiento de programas destinados a manejar, sobre bases reales, los humedales en los ámbitos locales, regionales y nacional (Semarnat, 2008).

El *Inventario Nacional de Humedales*, escala 1:250 000, cuenta con información sistematizada que permite ubicar, identificar y tipificar los objetos que lo conforman, en mapas que muestran la ubicación, tamaño, forma y tipo de humedales en una localidad geográfica, así como la superficie cubierta por cada tipo de humedal. De esta manera, el inventario auxilia en el desarrollo e implementación de las políticas que giran alrededor de dichos sistemas (Conagua, 2012).

Para proponer las normas de protección, restauración y aprovechamiento de los humedales, así como para fijar un entorno natural o perímetro de protección de la zona húmeda, a efecto de preservar sus condiciones hidrológicas y el ecosistema, es necesario contar con inventarios precisos de estos ecosistemas en escala 1:50 000 a nivel cuencas y 1:20 000 por humedal.

Metodología

Para realizar la delimitación, inventario y caracterización de los humedales en la zona de estudio, se usaron como apoyo las metodologías desarrolladas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2006) y por la Universidad Nacional Autónoma de México y Comisión Nacional del Agua (UNAM, 2011).

• ISSN 2007-2422

Ambas metodologías toman en consideración los elementos del paisaje geográfico que pueden ser cartografiados y están directamente relacionados con el agua. De esta manera se seleccionaron los temas de edafología, vegetación y uso de suelo, clima, hidrografía, relieve y el de regiones ecológicas. Es importante mencionar que en ambas metodologías se hace referencia a un enfoque potencial de aplicación cartográfica de multiescala, pero en la práctica fueron aplicadas en el país a una escala 1:250 000 ((INEGI, 2007; Conagua, 2012). Por tanto, la aportación del presente trabajo consiste en incorporar elementos hidrológicos y topográficos que de manera sistemática puedan ser empleados por múltiples instituciones para la delimitación de humedales en escalas 1:50 000 y 1:20 000, dentro de un contexto de cuenca hidrográfica, teniendo en consideración la coherencia de los datos en cada cambio de escala.

Mediante el empleo de un sistema de información geográfico (SIG) se obtuvo la delimitación de los humedales, cuya superficie en escala 1:250 000 fue de 51 983.7 ha, en comparación con la superficie obtenida para la escala 1:20 000, que alcanzó 54 649.4 ha. La figura 1 presenta el diagrama metodológico aplicado para obtener la delimitación de los humedales en la zona de estudio.

Para apoyar el análisis de la dinámica de la vegetación y uso del suelo en la zona de estudio se emplearon las imágenes Landsat-TM 21-49 y 21-50, con fecha de toma 4 de febrero de 1985 y 15 de enero de 1986, respectivamente, y las imágenes SPOT multiespectrales 603/319, 603/320, 604/319 y 604/320, cuya fecha de toma se encuentra referenciada en el cuadro 1, las cuales se seleccionaron para que a partir de su clasificación y análisis se generaran los mapas de uso del suelo correspondientes a los años 1986, 2004 y 2010. De esta manera se pretende representar los cambios derivados de fenómenos hidrometeorológicos extremos ocurridos en 1989 y 2005, que tuvieron impacto significativo en la zona de estudio.

Delimitación de humedales en la zona de estudio

El proceso para establecer el límite de la zona de interés en las escalas 1:50 000 y 1:20 000 se apoya en el mapa del *Inventario Nacional de Hu-*

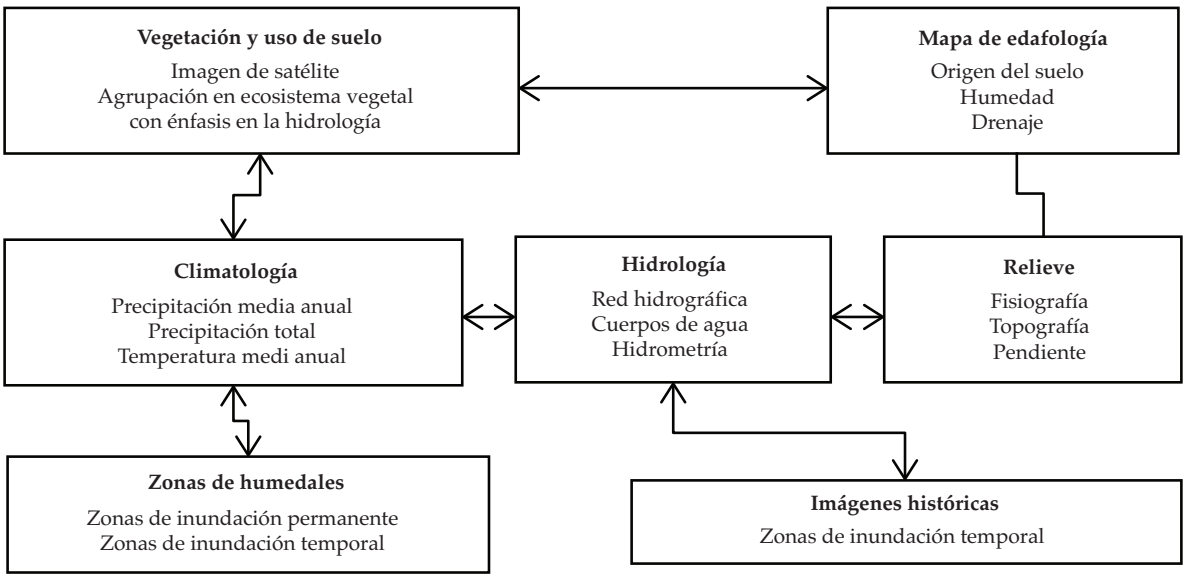


Figura 1. Diagrama metodológico del análisis espacial para la delimitación de humedales.

ISSN 2007-2422

Cuadro 1. Imágenes SPOT XS empleadas en el estudio.

Imagen	(*K*/*J*) fecha de toma	
603/319	16 de abril de 2004	15 de enero de 2011
603/320	10 de marzo de 2004	25 de noviembre de 2009
604/319	11 de marzo de 2004	19 de noviembre de 2009
604/320	24 de enero de 2004	05 de diciembre de 2009

medales, lo cual simplifica el trabajo de ubicación y delimitación; también adapta, complementa e incorpora elementos hidrológicos y topográficos no considerados en las metodologías del *Mapa de Humedales Potenciales 1:250 000* (INEGI, 2006) e *Inventario Nacional de Humedales* (UNAM-Conagua, 2012). La ubicación y delimitación de los humedales existentes en el área de interés se obtuvo a partir de la sobreposición de los mapas correspondientes al límite hidrológico de las subcuencas con el del *Inventario Nacional de Humedales* en escala 1:250 000, empleando un sistema de información geográfica (Alonso-EguíaLis *et al*., 2013).

Delimitación del perímetro de la zona de humedales para la escala 1:50 000

Derivado de los límites impuestos por la resolución espacial (área mínima cartografiable) de la escala 1:250 000 es necesario realizar un proceso de análisis apoyados en un SIG, para que el perímetro original cumpla con los requisitos establecidos para la escala 1:50 000, así como con la incorporación de las zonas sujetas a inundación temporal (Moreno *et al*., 2009). Para ello se emplearon tres fuentes de información:

a) El Banco *Nacional de Datos de Aguas Superficiales* (*Bandas*, GASIR) y el *Extractor Rápido de Información Climatológica* (*ERIC*, IMTA), empleados para identificar y seleccionar las estaciones hidrométricas y climatológicas dentro del área de estudio; analizar el comportamiento temporal, y determinar los periodos de mayor precipitación y escurrimiento en las cuencas de los ríos que aportan su caudal a los humedales.
b) El banco de información de imágenes de satélite Landsat (IMTA y EROS), que aportó las imágenes adquiridas durante los periodos de mayor precipitación (Alonso-EguíaLis *et al*., 2013) y escurrimiento identificados en *Bandas* y *ERIC*, para evaluar el comportamiento espacial de la superficie sujeta a inundación en la zona de estudio (figura 2).
c) La base de datos de la *Red Hidrográfica Interconectada* (*RHI*), versión 2, elaborada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010), que asocia los elementos hidrográficos con la subcuenca de localización, proporcionando un elemento para la nomenclatura de identificación de los humedales y los polígonos de los cuerpos de agua lóticos y lénticos adecuados para su incorporación y análisis, la cual se empleó para obtener la cobertura de cuerpos de agua en escala 1:50 000.

A continuación y dentro del ambiente de trabajo de un SIG, mediante técnicas de interpretación asistida por computadora, se generó el polígono que establece el límite de la zona inundable observada en la imagen de satélite tomada en la época húmeda. Después se sobreponen y analizan los polígonos de los cuerpos de agua de la cobertura de la *RHI*, omitiendo los presentes e incorporando los faltantes al mapa de trabajo; por último, se realiza la fusión de coberturas, para generar una nueva que integra la base de datos de las capas fusionadas, que conserva y asocia los datos que se utilizarán en la nomenclatura y clasificación de los humedales. La ubicación y delimitación de los humedales se obtuvo a partir de la sobreposición de los mapas

• ISSN 2007-2422

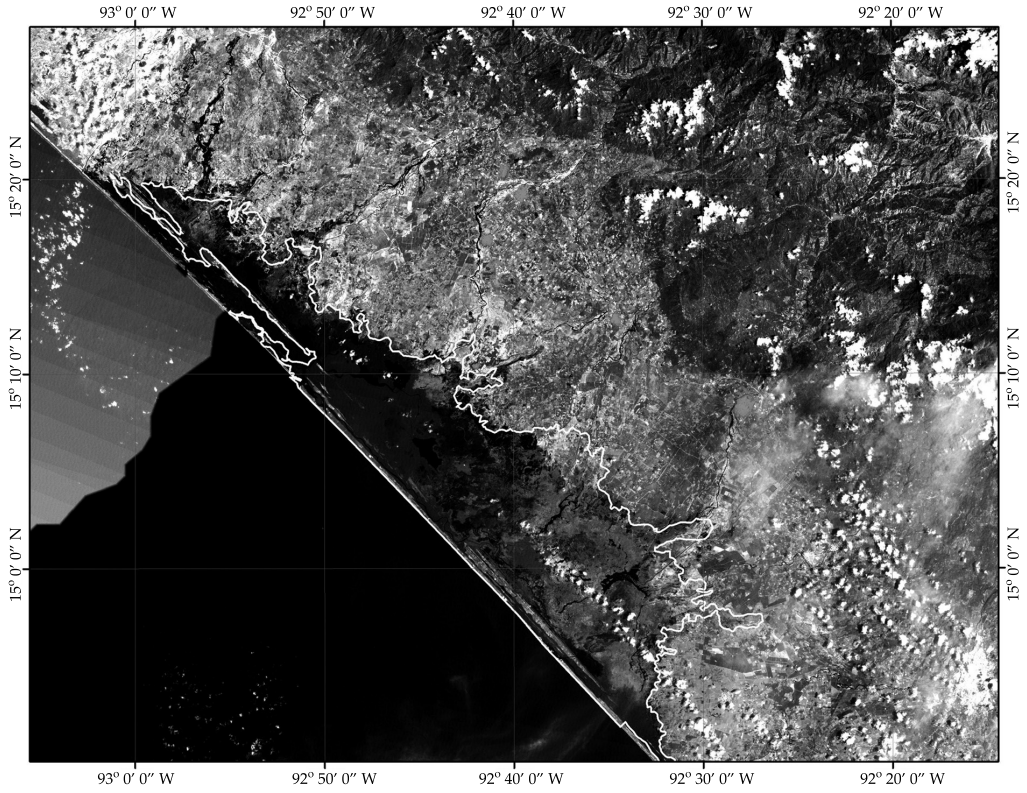


Figura 2. Registro de zonas inundables en la imagen Landsat, comparadas con el perímetro del humedal de INEGI en escala 1:250 000.

correspondientes al límite hidrológico de las subcuencas en la zona de estudio con el mapa del *Inventario Nacional de Humedales* en escala 1:250 000, desarrollado a partir de diferentes capas temáticas: edafología, climatología, hidrología, relieve y regiones ecológicas, empleando un sistema de información geográfica.

Caracterización de los humedales en escala 1:50 000

Para conocer las diferentes coberturas de vegetación y uso del suelo que se desarrollan en los humedales, se obtuvieron del mapa de uso de suelo y vegetación desarrollado inicialmente para caracterizar la zona de estudio y mediante un proceso de recorte y extracción realizado con base en el polígono que delimita la zona de humedales.

Verificación en campo

Una actividad previa a la verificación de campo consistió en el cargado de datos en un equipo de cómputo portátil. Las coberturas a verificar son las correspondientes al perímetro de los humedales, su capa de vegetación y uso de suelo; así como las coberturas de apoyo obtenidas del mapa topográfico digital escala 1:50 000, entre las que destacan las áreas urbanas, localidades rurales, vías de comunicación y toponimia. Se abre un proyecto en un ambiente de mapa móvil donde se organizan y configuran las coberturas cargadas previamente. De manera consensuada con los especialistas que participan en los diferentes temas del proyecto, se identifican y ubican los puntos de interés, de los cuales es necesario obtener sus registros en campo; por último, se realiza el recorrido de campo.

ISSN 2007-2422

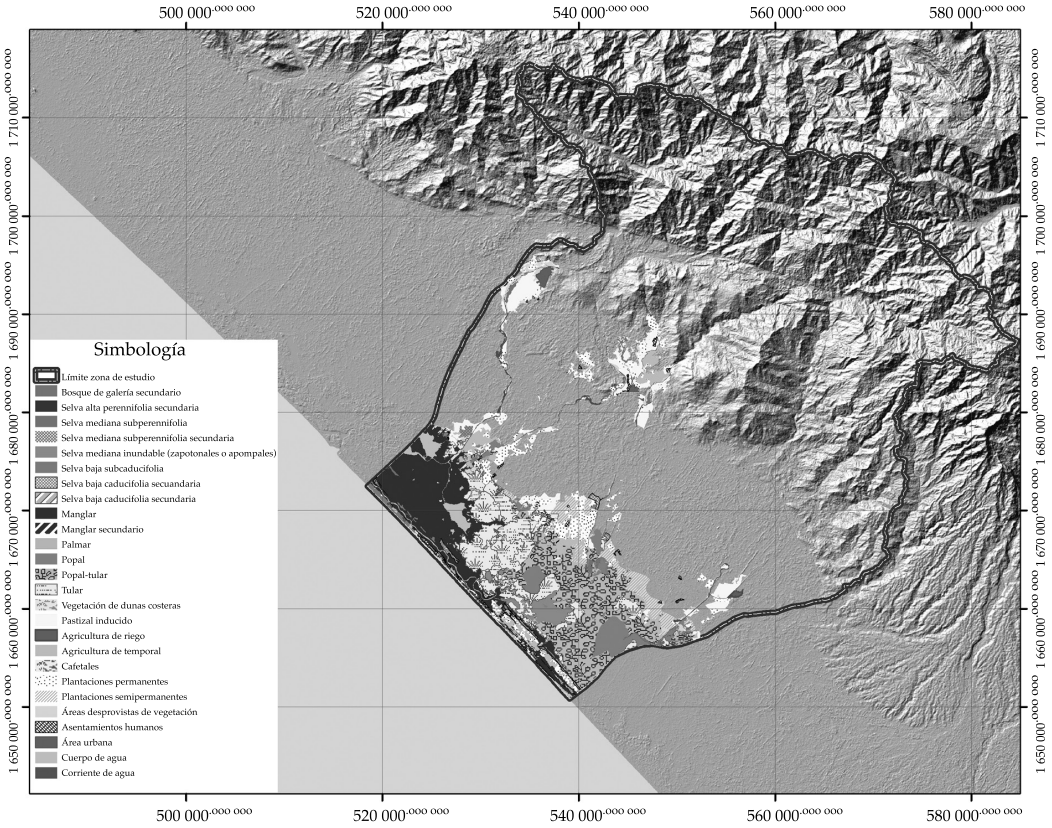


Figura 3. Distribución de los humedales en la zona de estudio y cobertura de vegetación.

Delimitación del perímetro de la zona de humedales escala 1:20 000

Como referente para limitar en escala 1:20 000 el área ocupada por los humedales, se empleó como base el límite obtenido a escala 1:50 000, afinando la delimitación y conservando la coherencia entre ambas escalas, usando los siguientes insumos documentales:

a) Cobertura de la *Red Hidrográfica Interconectada* (RHI). Esta cobertura establece un número de orden a cada corriente de la red hidrográfica, que se sobrepone a la imagen de satélite para definir el número de orden de la corriente que cumple con el área mínima de la escala 1:20 000 y de esta manera seleccionar los humedales fluviales a mapear en la escala mencionada.

b) Levantamiento de secciones topográficas. Una vez que fueron seleccionadas las corrientes consideradas como humedales fluviales que cumplen con los requisitos de la escala, el siguiente paso fue definir el área de influencia de la superficie hídrica en ambas márgenes de cada corriente con base en su orden, tipo de relieve y posición en la cuenca. Para ello, de las tres cuencas bajo estudio, se seleccionó la cuenca del río Huixtla, por contar con mejores condiciones de acceso para el desarrollo del trabajo topográfico. Los resultados obtenidos sirvieron de base para el dimensionamiento de las superficies de influencia de los humedales y se extrapolaron a las otras cuencas.

c) Imagen de satélite de alta resolución. La resolución 2.5 m de las imágenes SPOT 5 resulta indispensable para la caracterización

• ISSN 2007-2422

de los humedales en la presente escala de análisis, pues permite la adecuada interpretación de los diferentes elementos que conforman la superficie delimitada y apoya la clasificación del complejo de humedales (Alonso-EguíaLis *et al*., 2013).

d) Mapa de uso de suelo y vegetación escala 1:50 000. En un sistema de información geográfico se sobrepuso la imagen de alta resolución, el perímetro obtenido en escala 1:50 000 y la *Red Hidrográfica Interconectada*, y se determinó el perímetro de la superficie del humedal; se reclasificaron las clases de cobertura vegetal y uso del suelo presentes dentro del polígono (Yang, 2007), para cumplir con los requisitos de la escala 1:20 000. Al final, se revisó el mapa resultante y se incorporó a la base de datos geográfica del proyecto (figura 4).

Uso de suelo y vegetación en la cuenca hidrográfica

El objetivo de este análisis es tener el contexto biofísico y socioeconómico que se manifiesta espacialmente y que permite caracterizar el aprovechamiento retrospectivo, actual y prospectivo de los recursos en cada cuenca, que impactan la salud y permanencia de los humedales en las cuencas bajo estudio. Mediante el procesamiento de las imágenes de satélite se elaboraron los mapas de uso de suelo y vegetación, y se evaluó el estado de la vegetación natural (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2010a) presente en la zona de estudio en 1986, 2004 y 2010. Las clases establecidas, superficies y porcentajes de cobertura cuantificados se presentan en el cuadro 2. La figura 5 presenta la distribución de clases de uso de suelo y vegetación obtenida para 2004.

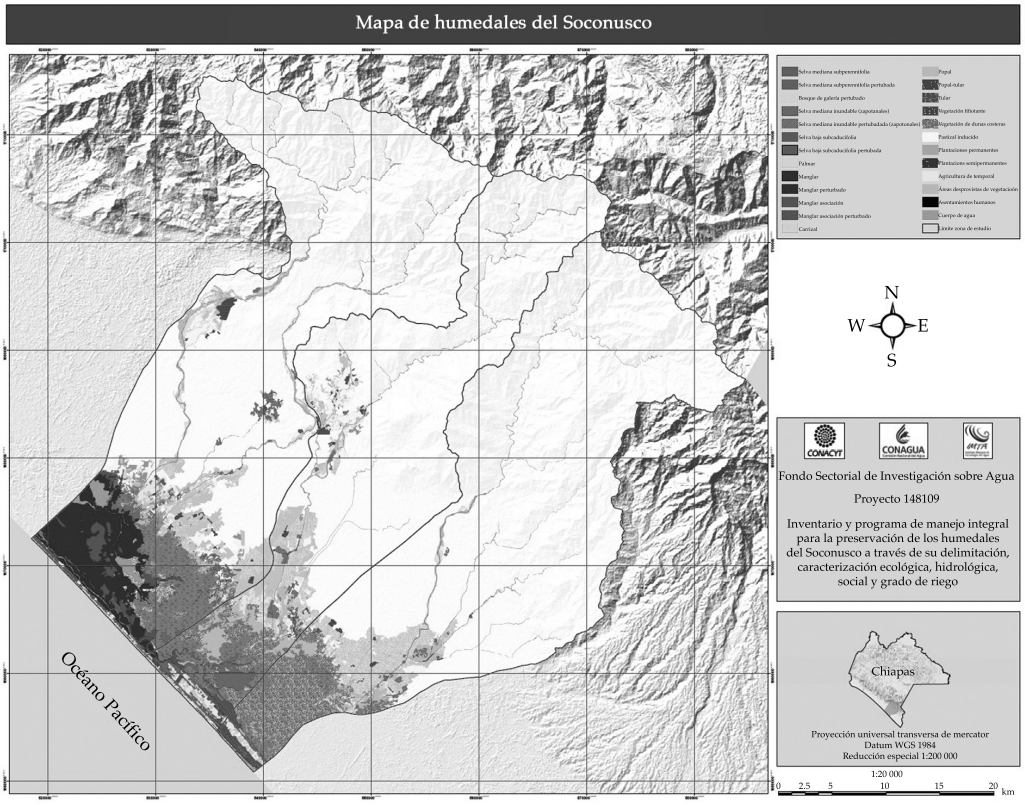


Figura 4. Mapa de los humedales en escala 1:20 000.

ISSN 2007-2422

Cuadro 2. Superficies por clases cuantificadas para los años 1986, 2004 y 2010.

Clases evaluadas	1986		2004		2010	
	Superficie		Superficie		Superficie	
	ha	%	ha	%	ha	%
Agricultura de riego	1 456	1	1 320	1	2 747	1
Agricultura de temporal	9 885	4	6 039	3	5 791	2
Asentamientos humanos	1 808	1	4 885	2	5 954	3
Bosque de galería	75	0	7	0	6	0
Bosque de galería perturbado	694	0	456	0	606	0
Bosque mesófilo de montaña	7 926	3	4 969	2	2 960	1
Bosque mesófilo de montaña perturbado	13 466	6	14 356	6	14 974	6
Bosque templado	4 654	2	3 664	2	2 433	1
Bosque templado perturbado	11 974	5	10 242	4	10 773	5
Cafetales	31 134	13	33 299	14	40 874	18
Cuerpo de agua	2 835	1	2 674	1	3 579	2
Manglar	7 994	3	8 123	3	7 907	3
Manglar perturbado	1 469	1	541	0	560	0
Pastizal inducido	29 179	13	34 843	15	32 172	14
Plantaciones	44 901	19	49 677	21	50 504	22
Popal	5 541	2	5 139	2	2 650	1
Popal-tular	4 940	2	6 418	3	8 612	4
Selva caducifolia	996	0	607	0	707	0
Selva caducifolia perturbada	4 842	2	4 113	2	3 701	2
Selva perennifolia	2 662	1	1 676	1	1 419	1
Selva perennifolia perturbada	33 183	14	29 649	13	23 743	10
Suelo desnudo	238	0	607	0	1 726	1
Tular	10 543	5	9 088	4	8 001	3
Vegetación de dunas costeras	98	0	99	0	92	0

Después se evaluó la tasa neta de cambio de cobertura de cada clase en el periodo 1986 a 2004, y de 2004 a 2010 por clase, presentados en los cuadros 3 y 4, respectivamente.

Uso prospectivo del suelo

La obtención de la cartografía prospectiva de las áreas de estudio es posible tras la aplicación de los siguientes módulos de análisis: cadenas de Markov y proyección estocástica; evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo; cadenas de Markov acopladas a un algoritmo de automatismo celular (Paegelow, Camacho-Olmedo, & Menor-Toribio, 2003).

Para determinar el uso prospectivo del suelo y la vegetación se aplicó el proceso Ca-Markov, empleando los mapas generados para 1986 y 2010, obteniéndose la distribución potencial de los usos del suelo y la vegetación para el año 2030, periodo establecido en la Agenda del Agua.

El algoritmo utiliza cadenas de Markov que permiten calcular la probabilidad de cambio de una clase a otra con base en la matriz de cambios de un cierto lapso. La idea subyacente es que los cambios observados en un periodo de tiempo tienen tendencia a repetirse en un periodo posterior. Para su aplicación se genera una matriz de transición que toma en cuenta la

• ISSN 2007-2422

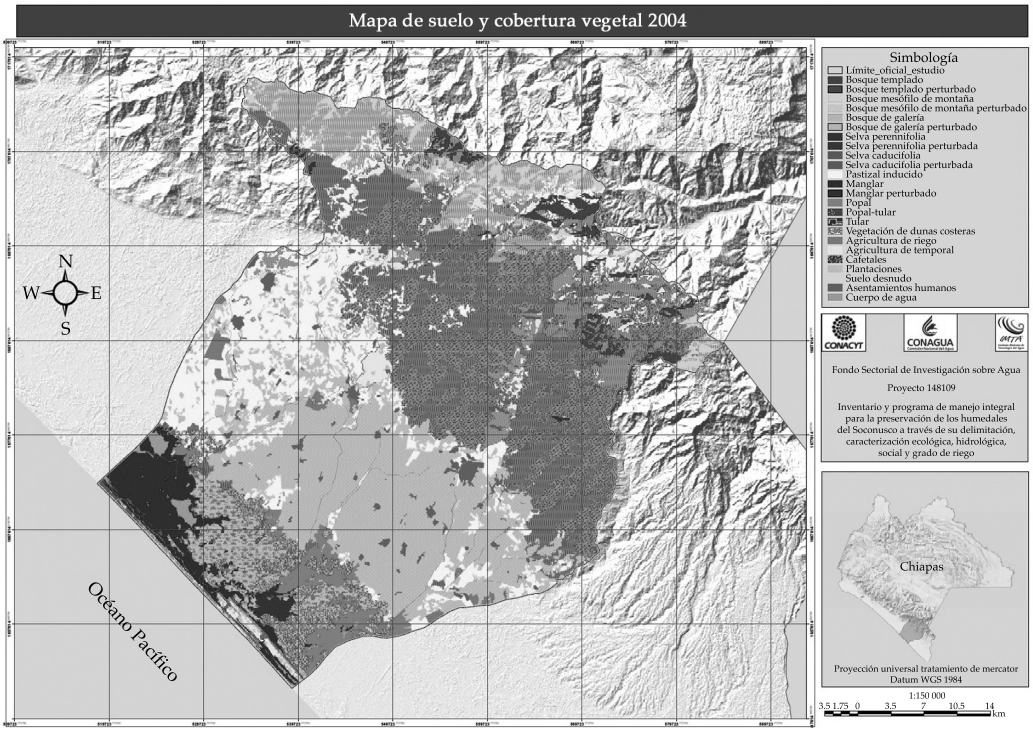


Figura 5. Distribución de clases de uso de suelo y vegetación para 2004.

Cuadro 3. Evaluación de la tasa de cambio en el periodo 1986-2004 por clase.

Clases evaluadas	Superficie (ha) año		Tasa neta de cambio (ha)	Tasa anual de cambio (ha/año)	Índice anual de cambio (%)
	1986	2004			
Agricultura de riego	1 456	1 320	-136	-8	-1
Agricultura de temporal	9 885	6 039	-3 846	-214	-2
Asentamientos humanos	1 808	4 885	3 077	171	9
Bosque de galería	75	7	-68	-4	-5
Bosque de galería perturbado	694	456	-238	-13	-2
Bosque mesófilo de montaña	7 926	4 969	-2 957	-164	-2
Bosque mesófilo de montaña perturbado	13 466	14 356	890	49	0
Bosque templado	4 654	3 664	-990	-55	-1
Bosque templado perturbado	11 974	10 242	-1 732	-96	-1
Cafetales	31 134	33 299	2 165	120	0
Cuerpo de agua	2 835	2 674	-161	-9	0
Manglar	7 994	8 123	128	7	0
Manglar perturbado	1 469	541	-928	-52	-4
Pastizal inducido	29 179	34 843	5 664	315	1
Plantaciones	44 901	49 677	4 776	265	1
Popal	5 541	5 139	-402	-22	0

ISSN 2007-2422

Cuadro 3 (continuación). Evaluación de la tasa de cambio en el periodo 1986-2004 por clase.

Clases evaluadas	Superficie (ha) año		Tasa neta de cambio (ha)	Tasa anual de cambio (ha/año)	Índice anual de cambio (%)
	1986	2004			
Popal-tular	4 940	6 418	1 478	82	2
Selva caducifolia	996	607	-389	-22	-2
Selva caducifolia perturbada	4 842	4 113	-730	-41	-1
Selva perennifolia	2 662	1 676	-986	-55	-2
Selva perennifolia perturbada	33 183	29 649	-3 534	-196	-1
Suelo desnudo	238	607	370	21	9
Tular	10 543	9 088	-1 455	-81	-1
Vegetación de dunas costeras	98	99	1	0	0

Cuadro 4. Evaluación de la tasa de cambio en el periodo 2004-2010 por clase.

Clases evaluadas	Superficie (ha) año		Tasa neta de cambio (ha)	Tasa anual de cambio (ha/año)	Índice anual de cambio (%)
	2004	2010			
Agricultura de riego	1 320	2 747	1 427	238	18
Agricultura de temporal	6 039	5 791	-248	-41	-1
Asentamientos humanos	4 885	5 954	1 068	178	4
Bosque de galería	7	6	-2	0	-3
Bosque de galería perturbado	456	606	149	25	5
Bosque mesófilo de montaña	4 969	2 960	-2 008	-335	-7
Bosque mesófilo de montaña perturbado	14 356	14 974	618	103	1
Bosque templado	3 664	2 433	-1 231	-205	-6
Bosque templado perturbado	10 242	10 773	531	89	1
Cafetales	33 299	40 874	7 574	1 262	4
Cuerpo de agua	2 674	3 579	905	151	6
Manglar	8 123	7 907	-215	-36	0
Manglar perturbado	541	560	19	3	1
Pastizal inducido	34 843	32 172	-2 671	-445	-1
Plantaciones	49 677	50 504	827	138	0
Popal	5 139	2 650	-2 490	-415	-8
Popal-tular	6 418	8 612	2 194	366	6
Selva caducifolia	607	707	100	17	3
Selva caducifolia perturbada	4 113	3 701	-411	-69	-2
Selva perennifolia	1 676	1 419	-257	-43	-3
Selva perennifolia perturbada	29 649	23 743	-5 905	-984	-3
Suelo desnudo	607	1 726	1 119	186	31
Tular	9 088	8 001	-1 087	-181	-2
Vegetación de dunas costeras	99	92	-7	-1	-1

• ISSN 2007-2422

imagen de un momento inicial (el uso del suelo y vegetación del 1986) y la imagen actual (el uso del suelo y vegetación del 2010). Para cada categoría se calcula la superficie que permanece con el mismo uso del suelo en el lapso considerado y la superficie cuyo uso del suelo cambia a otra categoría. A partir de la matriz de transición, el programa elabora una matriz de probabilidad de cambio entre las 24 clases que fueron establecidas. Las probabilidades de cambio de una clase a otra se obtienen dividiendo la superficie de cambio de una clase a otra por el total de la superficie de la clase en el pasado.

Una vez definidas las superficies para el escenario tendencial a futuro, el programa requiere de elementos para identificar las zonas donde se llevarán a cabo estos cambios. Para cada clase se requiere de un mapa de aptitud, que evalúe la probabilidad de que una clase exista en un punto con base en las características de este punto.

La distribución potencial de los usos del suelo y la vegetación para 2030, obtenida al aplicar el proceso Ca-Markov, se presenta en la figura 6 y en el cuadro 5 se tiene la distribución potencial de las superficies agrupadas en tipos generalizados de vegetación, en donde se detecta el incremento de los usos de suelo agropecuario, a costa de la pérdida de coberturas de vegetación natural.

De acuerdo con los datos obtenidos, se mantiene una tendencia descendente de las superficies correspondientes a clases de vegetación natural, principalmente de las selvas, bosques y vegetación hidrófita, lo cual puede apreciarse con claridad en el gráfico de tendencia ilustrado en la figura 7; mientras que las coberturas relacionadas con actividades agropecuarias presentan tendencia a incrementarse (figura 8).

El análisis espacial del aprovechamiento de los recursos naturales en la cuenca permitió observar una fuerte presión directa e indirec-

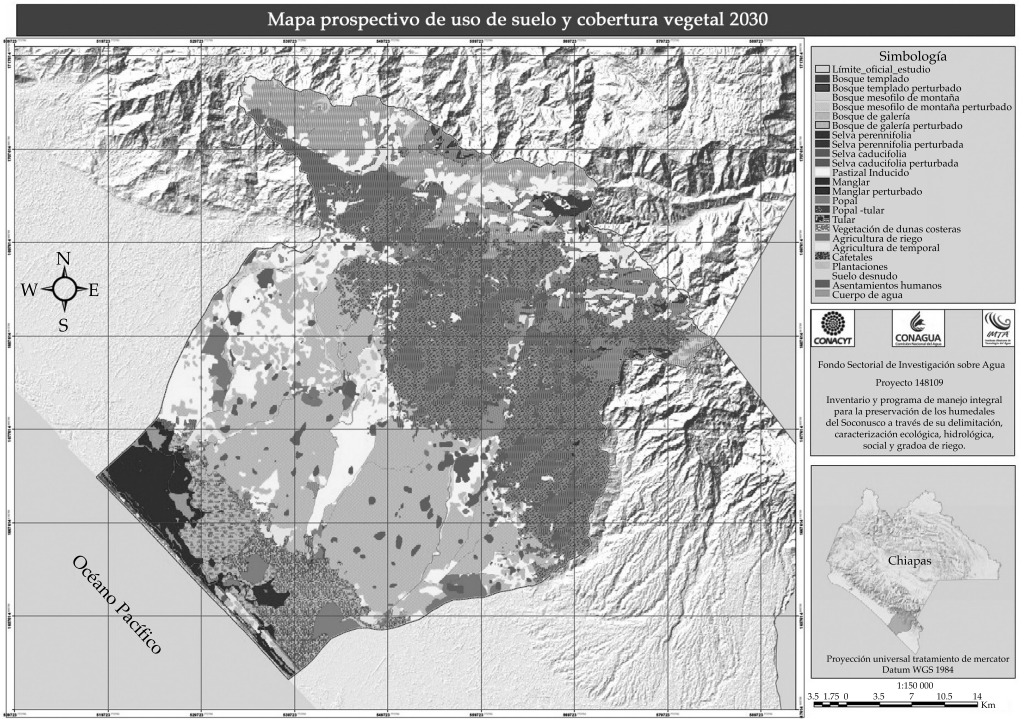


Figura 6. Distribución espacial de coberturas de vegetación y uso de suelo para 2030.

ISSN 2007-2422

Cuadro 5. Superficie evaluada por clase y tasa de cambio en el periodo.

Clases evaluadas	Superficie (ha) año		Tasa neta de cambio	Tasa anual de cambio	Índice anual de cambio
	2010	2030	(ha)	(ha/año)	(%)
Agricultura de riego	2 747	3 245	498	25	1
Agricultura de temporal	5 791	4 691	-1 100	-55	-1
Asentamientos humanos	5 954	9 065	3 111	156	3
Bosque de galería	6	5	-1	0	-1
Bosque de galería perturbado	606	560	-45	-2	0
Bosque mesófilo de montaña	2 960	1 534	-1 426	-71	-2
Bosque mesófilo de montaña perturbado	14 974	15 039	65	3	0
Bosque templado	2 433	1 626	-807	-40	-2
Bosque templado perturbado	10 773	8 914	-1 859	-93	-1
Cafetales	40 874	41 929	1 055	53	0
Cuerpo de agua	3 579	3 724	145	7	0
Manglar	7 907	7 406	-501	-25	0
Manglar perturbado	560	436	-124	-6	-1
Pastizal inducido	32 172	32 507	334	17	0
Plantaciones	50 504	52 516	2 012	101	0
Popal	2 650	2 315	-335	-17	-1
Popal-tular	8 612	8 654	42	2	0
Selva caducifolia	707	418	-289	-14	-2
Selva caducifolia perturbada	3 701	3 266	-435	-22	-1
Selva perennifolia	1 419	876	-543	-27	-2
Selva perennifolia perturbada	23 743	22 230	-1 513	-76	0
Suelo desnudo	1 726	2 305	579	29	2
Tular	8 001	7 033	-968	-48	-1
Vegetación de dunas costeras	92	207	115	6	6

ta sobre los sistemas acuáticos. En el caso de afectación directa, se detectó una reducción de la superficie del humedal mediante el drenado de áreas y cambio de uso de suelo, y como afectaciones indirectas se encontró que gran parte de los aprovechamientos realizados tanto en la cuenca alta, media y baja no son compatibles ecológicamente con la vocación del suelo, lo que da origen en la cuenca alta a un proceso de deslizamiento y erosión del suelo, cuyos sedimentos se depositan en especial en la zona de humedal costero ubicado en la cuenca baja, deteriorando de modo continuo las condiciones del hábitat acuático.

Conclusiones

El empleo de información hidrometeorológica aplicada a la selección de imágenes satelitales, y en el análisis de la distribución y comportamiento de las zonas sujetas a inundación mejoraron de forma sustancial la delimitación de los humedales palustres y fluviales ubicados en zonas con reducida pendiente, en particular

• ISSN 2007-2422

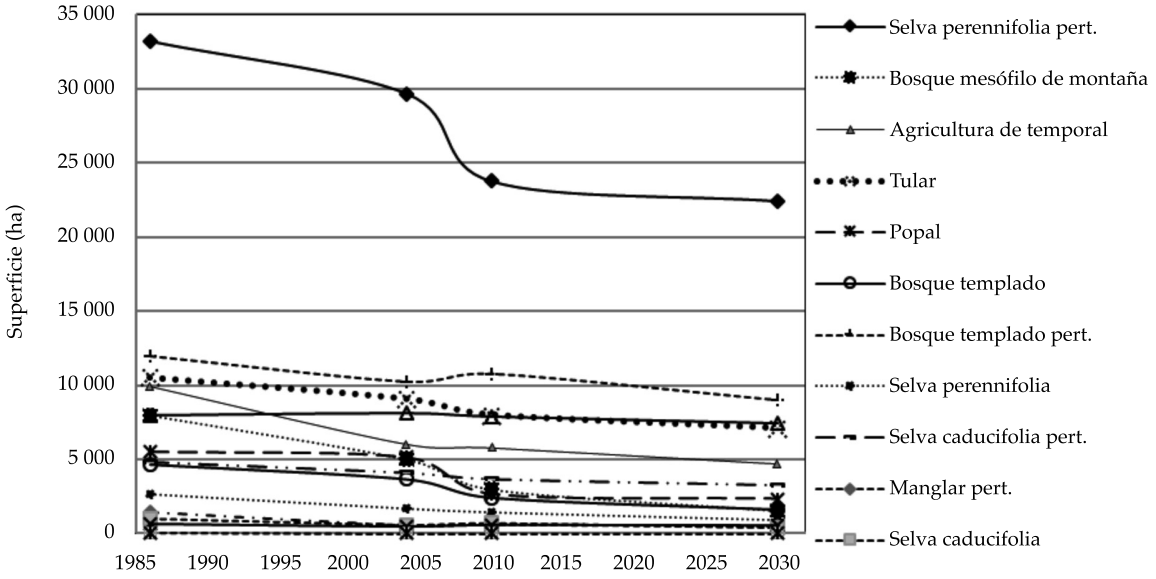


Figura 7. Coberturas de vegetación con tendencia a reducirse.

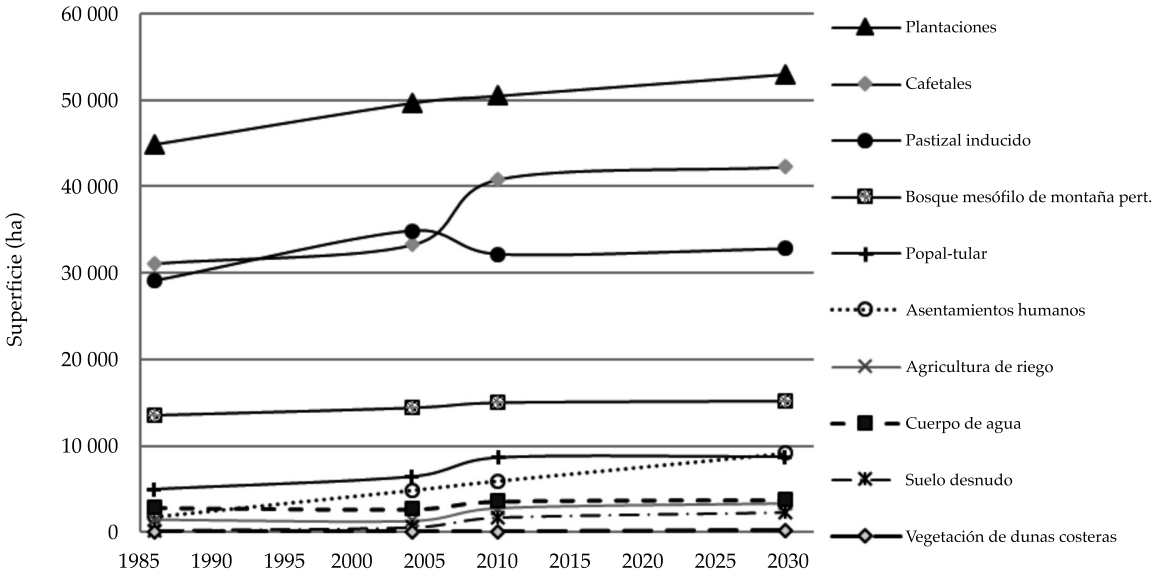


Figura 8. Coberturas con tendencia a incrementarse.

en la cuenca baja de los ríos; esto, al comparar los límites obtenidos con los mapas elaborados por el INEGI (2007) y por la Conagua-UNAM (González, 2012); además se favorece la congruencia de su representación cartográfica en cada cambio de escala.

El trabajo de campo, y de manera particular el levantamiento jerárquico selectivo de

ISSN 2007-2422

secciones topográficas de cauces, permitieron establecer criterios para una adecuada selección de las corrientes a cartografiar, así como el dimensionamiento del área de influencia de los humedales fluviales en escala 1:20 000, lo que constituye un aporte original del presente trabajo a los procedimientos realizados en México para la delimitación de los humedales fluviales.

Este tipo de estudios permite dimensionar, delimitar y caracterizar las zonas ocupadas por humedales; asimismo, proporcionan la información de apoyo necesaria para el planteamiento de acciones y programas para el uso y manejo sustentable de los recursos naturales, y de la riqueza y biodiversidad disponible en los humedales y en las cuencas hidrográficas.

Referencias

Alonso-EguíaLis, P., Brena, J., Castillo, C., Martínez, M., Sánchez, E., Vara, E., Ramírez, V., Mirén, V., Álvarez, J., Surre, P., Olea, S., Espinoza, E., Rioja, T., Rojas, A., Del Carpio, C., Sánchez, S., Carrillo, A., López, S., Pérez, M., Gómez, H., Gómez., & L. Vera, J. (2013). *Inventario y programa de manejo integral para la preservación de los humedales del Soconusco a través de su delimitación, caracterización ecológica, hidrológica, social y grado de riesgo* (491 pp.). México, DF: Fondo de Investigación sobre Agua, Conacyt-Conagua.

Conagua (2012). *Inventario Nacional de Humedales*. Recuperado de http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=4&n2=180&n3=180.

FAO (2007). *The World's Mangroves 1980-2005*. Rome: FAO Forestry Paper. Recuperado de ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/a1427e/a1427e00.pdf.

González, F. (2012). *Estudio interdisciplinario de los humedales de la república mexicana: inventario, metodología y su validación a nivel piloto* (33 pp.). México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México.

INEGI (2006). *Manual descriptivo humedales potenciales de México*. México, DF: INEGI, Dirección General de Geografía, 50 pp.

INEGI (2007). *Cartografía de humedales potenciales de México. Continuo Nacional Primera Edición escala 1:250,000*. Aguascalientes, México: INEGI.

INEGI (2010). *Documento técnico descriptivo de la red hidrográfica interconectada escala 1:50,000* (105 pp.). Aguascalientes, México: INEGI, Dirección General de Geografía y Medio Ambiente.

Moreno-Casasola, P., Brena, J., Alonso-EguíaLis, P., Acosta, I., Campos, A., Capistrán, A., Castillo, C., Díaz C., Damian, M., Del Río, M., Infante, D., Fernández, A., Flores, M., Gutiérrez, C., Isunza, E., Landgrave, R., López, E., López, H., Madero, C., Mateos, A., Martínez M., Maya, E., Monroy, R., Olvera, E., Pale, J., Paradowska, K., Priego, A., Salcedo, E., Sánchez, E., Sánchez, J., Velázquez, J., & Zavala, J. (2009). *Inventario, delimitación, caracterización y uso sustentable de los humedales de la cuenca del río Papaloapan, México* (525 pp.). México, DF: Fondo de Investigación sobre Agua, Conacyt-Conagua.

Paegelow, M., Camacho-Olmedo, M. T., & Menor-Toribio, J. (2003). Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, GeoFocus*, *3*, 22-44.

Secretaría de la Convención de Ramsar (2010a). *Manual 9: manejo de cuencas hidrográficas* (93 pp.). (4a. edición). Gland, Suiza: Secretaría de la Convención de Ramsar.

Secretaría de la Convención de Ramsar (2010b). *Manual 15: inventario de humedales* (83 pp.) (4a. edición). Gland, Suiza: Secretaría de la Convención de Ramsar.

Semarnat (2008). *Documento estratégico rector del inventario nacional de humedales* (57 pp.). México, DF: Semarnat.

Stolk, M. E., Verweij, P. A., Stuip, M., Baker, C. J., & Oosterberg, W. (2006). *Valoración socioeconómica de los humedales en América Latina y el Caribe*. Los Países Bajos: Wetlands International.

Yang, X. (January 2007). Integrated Use of Remote Sensing and Geographic Information Systems in Riparian Vegetation Delineation and Mapping. *International Journal of Remote Sensing*, *28*(2), 353-370.

Dirección institucional de los autores

Geóg. Jorge Brena
Ing. Cervando Castillo
Ing. Ana Wagner

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, México
Teléfono: + 52 (777) 3293 600, extensiones 863, 104 y 530
jbrena@tlaloc.imta.mx
cervando@tlaloc.imta.mx
awagner@tlaloc.imta.mx

Haga clic aquí para escribir al autor

• ISSN 2007-2422

Modelación del riesgo de inundaciones en el estado de Tabasco en el periodo 1961-2007

• Ana Laura Reyes-Olvera •
Colegio de Postgraduados, México

• Eduardo Gutiérrez-González* •
Instituto Politécnico Nacional, México
*Autor de correspondencia

Resumen

Reyes-Olvera, A. L., & Gutiérrez-González, E. (marzo-abril, 2016). Modelación del riesgo de inundaciones en el estado de Tabasco en el periodo 1961-2007. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(2), 99-114.

En este trabajo se propone un indicador del riesgo de inundación en la región hidrográfica 30 y parte de la 29 que se encuentran en el estado de Tabasco, México, considerando tres factores: vulnerabilidad, costo y peligro. En el caso de la vulnerabilidad, se medirá la susceptibilidad de una región frente a una inundación; para esto se consideran elementos sociales y naturales, en donde el primero mide la disposición de los servicios con los que cuenta la población y el segundo incluye los recursos hidrológicos que atraviesan la región de estudio. Para el costo se considera cuánto y cómo afecta el daño provocado por una inundación, tomando en cuenta dos factores: número de habitantes y bienes que posee la población. En el tercer factor se consideran las precipitaciones máximas anuales de 1961 a 2007 tomadas de la base de datos *Maya* v. 1.0, para calcular la probabilidad de ocurrencia de inundación y sus periodos de retorno; para el peligro se propone una prueba de bondad de ajuste *bootstrap*, basada en el coeficiente de correlación muestral, estimando el tamaño y la potencia de la prueba usando simulación. Los parámetros de la distribución fueron estimados por máxima verosimilitud y con la prueba se verificó que las observaciones cumplieran con la distribución Gumbel o de valores extremos generalizada, elegidas por los criterios log-verosimilitud, AIC y correlación.

Palabras clave: índice de riesgo, vulnerabilidad, costo y peligro, valores extremos, prueba *bootstrap*, mapa de riesgo, niveles y periodos de retorno, componentes principales.

Abstract

Reyes-Olvera, A. L., & Gutiérrez-González, E. (March-April, 2016). Flood Risk Modeling for the State of Tabasco, 1961-2007. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 7(2), 99-114.*

This paper proposes a flood risk indicator for hydrographic region 30 and a portion of 29, located in the state of Tabasco, Mexico. The indicator takes into account three factors: vulnerability, cost and hazards. Vulnerability measures the susceptibility of a region to flooding, which includes social and natural elements —that is, the services available to the population and the hydrological resources that pass through the region, respectively. In terms of cost, this takes into account the amount and type of damage from flooding, including the number of inhabitants and goods possessed by the population. The third factor, hazards, is based on annual maximum precipitations from 1961 to 2007, taken from the Maya v. 1.0 database, to calculate the probability of the occurrence of flooding and its return periods. For the hazards, a bootstrap goodness-of-fit test was proposed based on the sample correlation coefficient, using simulation to estimate the size and statistical power of the test. The distribution parameters were estimated according to maximum likelihood and the test verified that the observations fit the Gumbel distribution or generalized extreme values selected by the log-likelihood, AIC and correlation criteria.

Keywords: *Risk index, vulnerability, cost and hazard, extreme value, bootstrap test, risk level map and return periods, principal components.*

Recibido: 04/06/2012
Aceptado: 06/10/2015

Introducción

El agua es uno de los recursos naturales más valiosos de cualquier país debido a los beneficios sociales y económicos que se derivan de su consciente explotación; sin embargo, junto con las ventajas existen también situaciones extremas, como inundaciones y sequías (Zucarelli, 2013).

En el mundo, las inundaciones están aumentando más rápidamente que ningún otro desastre

y han causado severos problemas tanto sociales como económicos. Por esta razón se han desarrollado diversas investigaciones para analizar eventos extremos y la forma de evaluar el riesgo de inundación. En México, Uribe-Alcántara, Montes-León y García-Celis (2010) propusieron un mapa de índices de inundación para identificar las zonas propensas a inundaciones.

El estudio de las inundaciones es complejo, pues, por ejemplo, el daño económico directo a un edificio inundado no sólo depende de la profundidad del agua sino también del uso del inmueble. Otros factores importantes son las características del edificio, las variables socioeconómicas y la calidad de la respuesta de emergencia, entre otras (Smith, 2001). En la Ciudad de México, Baró-Suárez, Díaz-Delgado, Calderón-Aragón, Esteller-Alberich y Cadena Vargas (2011) realizaron una investigación sobre el costo más probable de daños en zonas habitacionales y propusieron una caracterización de costo con base en el índice de marginación urbana.

Existen diferentes formas de examinar las inundaciones. Hunt las analiza como un desastre natural en el que se deben identificar los peligros y la vulnerabilidad para poder superarlos (Hunt, 2002). El Centro Nacional de Prevención al Desastre (Cenapred, 2006), por el contrario, no maneja los desastres como naturales sino como producto de las condiciones de vulnerabilidad y exposición. Entonces, si lo que se desea es prevenir los desastres, es necesario hablar de riesgo. Es posible señalar varias definiciones de riesgo, que se basan principalmente en los factores de los que depende su estimación. Además es importante mencionar que los efectos de las inundaciones en la sociedad no pueden ser representados en una cotización monetaria (Green, Van Der Veen, Wiertra, & Penning-Rowsell, 1994).

En algunos otros trabajos, Herrera-Díaz, Rodríguez-Cuevas, Couder-Castañeda y Gasca-Tirado (2015), así como Flowers-Cano, Jeffrey-Flowers y Rivera-Trejo (2014), al igual que Young (2002), combinan los métodos estadísticos y determinísticos para analizar datos pasados y predecir los niveles de inundación y de ríos. Por su parte, Bayliss y Reed (2001) discuten diferentes formas de estudiar las inundaciones históricas y revisan métodos para incorporar datos históricos al análisis de frecuencias de inundaciones. Se puede incorporar información meteorológica para fortalecer la estimación del riesgo; la lluvia puede ser un notorio indicador fiable de la inundación (Duncan, 2002). Sin embargo el riesgo abarca dos aspectos: peligro (P) y vulnerabilidad (V) (Mileti, 1999), aunque si bien no es la única definición que se maneja para el riesgo, sí es una de las más utilizadas. Ordaz incluye un tercer factor para la expresión del cálculo de riesgo por algún fenómeno natural (Ordaz, 1996), el costo (C) o valor de los bienes expuestos; entonces, el riesgo es producto de tres factores: $R = V \times C \times P$. Nótese que en realidad se trata de la misma definición, ya que la vulnerabilidad está compuesta de dos elementos: exposición o daño potencial, y susceptibilidad o pérdida (Merz, Thieken, & Gocht, 2007). Por lo tanto, para obtener una medida del riesgo, se debe trabajar sobre estos tres últimos factores.

Debido al impacto de las inundaciones sobre la sociedad y las pérdidas monetarias, es importante la construcción de un índice de vulnerabilidad (Tapsell, Penning-Rowsell, & Tunstall, 2002). La vulnerabilidad tiene diferentes conceptos, por ejemplo, Blaikie, Wisner, Cannon y Davis (1994) analizan las condiciones socioeconómicas que aumentan el grado de vulnerabilidad.

En cuanto al peligro, se deben calcular las probabilidades de que ocurra un fenómeno que pueda dañar lo expuesto (Ordaz, 1996). Por el efecto de las inundaciones, el riesgo puede ser generado por lluvias, ciclones tropicales o falla de obras hidráulicas.

En este artículo, las inundaciones se estudian cuando se registran valores extremos de precipitaciones de lluvias y es aquí donde se introducirá la teoría sobre valores extremos.

Fisher y Tippett (1928) derivaron la forma límite de la distribución del valor máximo de una muestra aleatoria, encontrando las tres posibles distribuciones: Gumbel, Weibull y Fréchet. A

• ISSN 2007-2422

partir de esto se desarrollan aportaciones de interés como las de Gumbel (Gumbel, *Les moments des distribution limite du terme maximum dùne sèrie alèatoire*, 1934), quien además presenta el primer libro de importancia (Gumbel, *Statistical of Extremes*, 1958), en el que trabajó con eventos extremos contemplando varias aplicaciones. Por su parte, Gnedenko presenta en forma general y con una prueba rigurosa el teorema de los tipos de distribución para valores extremos propuesto por Fisher y Tippett (Gnedenko, 1943). Otra aportación importante la dieron Von Mises (1936) y Jenkinson (1955), quienes trabajaron sobre la distribución de valores extremos y propusieron una distribución que combina las tres familias de distribución de valores extremos, la cual es conocida como DVEG. De 1990 a 2011, el desarrollo estadístico ha sido sustancial en el área, como en el caso, entre otros, de Tawn (1992), Rosbjerg y Madsen (1996), Coles y Dixon (1999, *Likelihood-Based Inference for Extreme Values Models Extremes*) y Coles (2001, *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*).

Obtenida una medida del riesgo, se implementan los mapas de peligro y riesgo por inundación para ubicar las zonas en diferentes categorías de riesgo y desarrollar un plan de manejo. Tawatchi y Mohammed (2005), y Lehner y Döll (2001) proporcionan un ejemplo para aproximar a escala global el análisis con mapas concernientes a la situación de inundación en Europa; en cuanto a México, se tienen los mapas de riesgo a escala municipal por inundaciones (Cenapred, 2006).

En México, en la región del sistema Grijalva-Usumacinta del estado de Tabasco se han presentado inundaciones en los últimos años. Una de ellas, en 2007, fue una de las de mayor intensidad en los últimos 50 años (Rivera-Trejo, Soto-Cortés, & Barajas-Fernández, 2009). Por su parte, Arreguín-Cortés, Rubio-Gutiérrez, Domínguez-Mora y Luna-Cruz (2014) analizaron los factores que influyen en las inundaciones de la planicie tabasqueña, como la ausencia de ordenamiento territorial adecuado y la deforestación de la parte alta de las cuencas.

Por esta razón, en la presente investigación se calculan los índices para el riesgo de inundación y sus periodos de retorno con cuatro escenarios de peligro: 100, 150, 200 y 250 mm. Para esto se propone una prueba de bondad de ajuste *bootstrap* paramétrica basada en el coeficiente de correlación muestral, y se comprueba el tamaño y potencia de la prueba por simulación realizando 10 000 réplicas.

Objetivo general

Modelar el riesgo de inundaciones en el estado de Tabasco por causas climáticas extremas.

Objetivos específicos

- Proponer un modelo estadístico basado en la teoría de valores extremos que permita determinar el comportamiento y las tendencias de las precipitaciones extremas.
- Calibrar el modelo estadístico usando una base de datos histórica de precipitación y niveles hidrométricos del estado de Tabasco.
- Construir un mapa de riesgo de inundaciones por municipio en el estado de Tabasco.

Metodología

Por lo común se cree que el peligro es el único responsable de los desastres, pero en buena medida es la sociedad la que se expone con su infraestructura, organización y cultura para enfrentar fenómenos con alto grado de peligro. Por lo tanto, se debe entender que los desastres no sólo son naturales, sino que también son producto de condiciones de vulnerabilidad y exposición (Cenapred, 2006).

Por lo anterior, es necesario encontrar una medida que represente el riesgo y sus cambios a través del tiempo; puede ser estadísticamente difícil de modelar debido a la gran cantidad de variables que intervienen en el modelo. Una forma de tratar y aligerar la solución a este problema puede ser introduciendo los números índice. Los índices, desde su aparición, han

ISSN 2007-2422

llegado a ser cada vez más importantes como indicadores de los diferentes cambios que rodean a la sociedad.

En este trabajo se van a construir los índices y mapas de riesgo a escala municipal en el estado de Tabasco. Para el riesgo se utilizará la definición de Ordaz (1996), quien maneja al riesgo como el producto de tres factores (ver expresión (1)). Para cada uno de éstos se calculará un indicador:

$$R = V \times C \times P \qquad (1)$$

En donde V representa la vulnerabilidad, C, el valor de los bienes expuestos y P es el peligro o probabilidad de ocurrencia de un fenómeno que pueda dañar lo expuesto.

Vulnerabilidad

La vulnerabilidad puede tener diferentes conceptos. En este artículo se considera como una medida de qué tan susceptible es un bien expuesto a la ocurrencia de un fenómeno perturbador (Ordaz, 1996). Para su análisis se consideran dos variables: por un lado, los servicios con los que cuenta la comunidad (energía eléctrica, agua potable y drenaje) y, por el otro, sus principales recursos hidrológicos (ríos y lagunas).

En el caso de los servicios, se construye un índice de servicios a través de tres variables:

PO_NDEE: porcentaje de ocupantes que no dispone de energía eléctrica.
PO_NDAE: porcentaje de ocupantes que no dispone de agua entubada.
PO_NDD: porcentaje de ocupantes que no dispone de drenaje.

Estos factores son ponderados mediante el uso de componentes principales (*CP*) del análisis multivariado. El uso de *CP* garantiza una combinación lineal con máxima varianza que brinda los mejores coeficientes y que explica de modo adecuado la situación de la comunidad.

La segunda variable, recursos hidrológicos con los que cuenta cada municipio, es considerada debido a que la región de Tabasco está a muy poca altura sobre el nivel del mar; es una zona de ríos, lagunas y pantanos. Además, a lo largo de su historia, Tabasco ha sufrido inundaciones por el desbordamiento de los ríos que atraviesan la entidad. Por ejemplo, la inundación de 2007 (Rivera-Trejo *et al*., 2009) en el municipio de Paraíso se debió al exceso de lluvia que coincidió con el oleaje en el Golfo de México, que evitó las descargas de los ríos Grijalva y Carrizal hacia el mar. Entonces, para los recursos hidrológicos, se construye un índice de ríos a través de una ponderación por municipio que depende del número de ríos que se encuentren en él, además de considerar la capacidad de cada uno de los ríos según la información del nivel de agua máximo ordinario (NAMO).

Costo de los bienes expuestos

La componente costo, C, de la ecuación (1) mide la cuantía de lo que es susceptible de afectarse durante la ocurrencia de un fenómeno perturbador (Ordaz, 1996). Entonces, para la construcción de un indicador de costo, se consideran los bienes con los que cuenta la población (televisión, lavadora, refrigerador, computadora, automóvil) y el número de habitantes por comunidad. El número de habitantes se toma en cuenta por el supuesto de que "A mayor población, mayor riqueza". Entonces, el índice de costo de bienes expuestos se construye con base en los siguientes cinco indicadores de bienes, que después serán ponderados mediante el uso de componentes principales:

PODT: porcentaje de ocupantes que dispone de televisión.
PODR: porcentaje de ocupantes que dispone de refrigerador.
PODL: porcentaje de ocupantes que dispone de lavadora.
PODC: porcentaje de ocupantes que dispone de computadora.
PODA: porcentaje de ocupantes que dispone de automóvil o camioneta.

• ISSN 2007-2422

Peligro

El peligro, *P*, de inundación en el contexto de esta investigación se define como la probabilidad de ocurrencia de una situación de inundación potencialmente dañina en un área dada y con cierto periodo especificado. Para el análisis de este componente, la información a utilizar dependerá del tipo de inundación que se analice y pueden definirse de acuerdo con:

- La duración de la inundación: lenta o súbita.
- El mecanismo que las genere: pluviales, fluviales, costeras o falla de obras hidráulicas.

En este caso, se calcula un valor para el peligro tomando a la lluvia como un indicador fiable de la inundación; no se estudian las inundaciones dadas directamente por fallas de obras hidráulicas, aunque es importante hacer notar que cuando se presentan valores extremos de precipitación es muy probable que ocurran fallas en obras hidráulicas. Por tanto, para el cálculo del factor peligro se analizan los datos de precipitación en Tabasco y zonas cercanas; estas últimas se consideran, pues las inundaciones no dependen sólo de la precipitación local, sino de la precipitación en la cuenca aguas arriba del punto de desborde.

Datos de precipitación

La información de la precipitación se obtuvo de las mediciones diarias —desde 1961 hasta 2007— de precipitación tomadas en las estaciones registradas por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) con la herramienta *CLICOM*, en su versión interpolada en malla regular de 0.2 grados de longitud por 0.2 grados de latitud (*Maya* v. 1.0).

Para obtener la base de datos de cada municipio se delimitó una región para cada uno. Esto se realizó con ayuda de la información de las subcuencas, cuyo caudal influye en el municipio de estudio (ya sea parcial o totalmente). En caso de que parte de alguna subcuenca entre en el municipio, pero la aportación de su caudal no influya, se toman sólo los nodos que se encuentren dentro del municipio. Con esto se determina cuáles son los nodos que influyen en el análisis, así se tendrán tantas series de datos como el número de nodos incorporados en el estudio. Entonces, para obtener una sola serie, se realiza una combinación lineal, que resulte adecuada, de los nodos considerados. Para esto nuevamente se utiliza la teoría de componentes principales; en este caso, las variables son los nodos del municipio. Las CP obtenidas corresponden a los pesos dados a cada nodo para obtener la combinación lineal deseada que finalmente será la serie de datos que represente al municipio.

Análisis de los datos

Dadas las series de datos de cada municipio, se extraen las precipitaciones máximas anuales. Sea $x_1, x_2, \ldots x_m$ una muestra de la variable aleatoria X_i: precipitación en el municipio i. Entonces se forman los vectores $x^{(1)} = (x_1^1, \ldots, x_n^1)$, $x^{(2)} = (x_1^2, \ldots, x_n^2)$, $x^{(k)} = (x_1^k, \ldots, x_n^k)$. Con los vectores se calculan los máximos anuales, $M_{n,i} = \max\{x_1^i, \ldots, x_n^i\}$, $i = 1, \ldots, k$, que gracias a la teoría de valores extremos se consideran *iid* (independientes e idénticamente distribuidos), entonces $F(x) = P(M \leq x) = \{F(x)\}^k$. Por el teorema de Fisher y Tippett (1928) se asume que $M_{n,i}$ sigue una de las distribuciones de valores extremos (DVE) mostradas en (2), (3) y (4):

$$\text{Gumbel: } F(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]\right\}, \quad x \in \mathbb{R} \quad (2)$$

$$\text{Fréchet: } F(x) = \begin{cases} 0 & x \leq \mu \\ \exp\left[-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-\varepsilon}\right] & x > \mu \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{Weibull: } F(x) = \begin{cases} 0 & x < \mu \\ 1-\exp\left\{-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{\varepsilon}\right\} & x \geq \mu \end{cases} \quad (4)$$

ISSN 2007-2422

con parámetros $\mu \in \mathbb{R}$, $\sigma > 0$ y $\varepsilon > 0$ o bien con su generalización dada por Gnedenko, la distribución de valores extremos generalizada (DVEG), mostrada en (5):

$$F(x) = \exp\left\{-\left[1+\varepsilon\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]_+^{-\frac{1}{\varepsilon}}\right\} \qquad (5)$$

donde $y_+ = \text{máx}\{y, 0\}$, $\mu \in \mathbb{R}$, $\sigma > 0$ y $\varepsilon \in \mathbb{R}$.

En esta investigación se estudió el ajuste con la distribución Gumbel, por ser una de las más empleadas en el campo de las inundaciones en México, y la DVEG, cuyo uso se ha ampliado en los últimos años, pero aún no es muy aplicada para las precipitaciones máximas en México. Los parámetros μ, σ y ε se estiman por el método de máxima verosimilitud, para aprovechar las propiedades asintóticas de estos estimadores y obtener los intervalos de confianza de forma sencilla. La función log-verosimilitud para la DVEG y la distribución Gumbel están dadas en (6):

$$l(\mu,\sigma,\varepsilon;\mathbf{x}) = \begin{cases} -n\log(\sigma) - \left(\frac{1}{\varepsilon}+1\right)\sum_{i=1}^{n}\log\left[1+\varepsilon\left(\frac{x_i-\mu}{\sigma}\right)\right] \\ -\sum_{i=1}^{n}\left[1+\varepsilon\left(\frac{x_i-\mu}{\sigma}\right)\right]^{1/\varepsilon} \quad \text{si } \varepsilon \neq 0 \\ -n\log(\sigma) - \sum_{i=1}^{n}\exp\left[\frac{-x_i-\mu}{\sigma}\right] - \sum_{i=1}^{n}\left[\frac{-x_i-\mu}{\sigma}\right] \text{ si } \varepsilon = 0 \end{cases} \qquad (6)$$

Sean $(\hat{\mu},\hat{\sigma},\hat{\varepsilon})$ los estimadores de máxima verosimilitud (EMV) de (μ,σ,ε), éstos se calculan con las librerías *evd* y VGAM del Proyecto R. Para la estimación por intervalos, se usa el hecho de que los EMV se distribuyen asintóticamente normal $\hat{\theta} \sim N_d\left(\theta, \mathbf{I}^{-1}(\hat{\theta})\right)$, donde $\mathbf{I}(\hat{\theta})$ es la matriz de información de Fisher. Entonces, el intervalo de confianza a $(1-\alpha)100\%$ para cada componente de θ está dado por $\hat{\theta}_i \pm Z_{\alpha/2}\sqrt{c_{ii}}$, en donde $Z_{\alpha/2}$ es el valor de la variable normal estándar con área derecha igual a $\alpha/2$, y c_{ii} es el i-ésimo elemento de la diagonal $\mathbf{I}^{-1}(\hat{\theta})$.

Elección del modelo

La elección del modelo se basó principalmente en el criterio de información de Akaike (AIC), $\text{AIC}(k) = -2\log(L(\theta_k)) + 2k$, donde k es el número de parámetros del modelo y $\log(L(\theta_k))$ es el logaritmo de la verosimilitud del modelo, considerando mejor modelo si tiene menor valor de AIC. Un segundo criterio para modelos con la misma cantidad de parámetros es el valor del logaritmo de la verosimilitud (log-veros), eligiendo el modelo que tenga mayor valor de log-verosimilitud. El tercer criterio asume que existe una relación lineal entre la distribución empírica y la distribución teórica correspondiente, Gumbel (2) o VEG (5), por lo que se emplea el coeficiente de correlación muestral (7) como medida de asociación y se prefiere el modelo cuyo coeficiente de correlación muestral sea más cercano a uno:

$$r_n(\mathbf{Y},\mathbf{Z}) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Y_i-\bar{Y})(Z_i-\bar{Z})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Y_i-\bar{Y})^2(Z_i-\bar{Z})^2}} \qquad (7)$$

Prueba *bootstrap* basada en el coeficiente de correlación muestral

Sea $X_1,\ldots, X_n$ una muestra aleatoria de una función de distribución $F_X(x) = P(X \leq x)$. El contraste de hipótesis a probar está dado por:

$$H_0: f(x) \in \mathbf{F}^*(x) \quad vs. \quad H_1: f(x) \notin \mathbf{F}^*(x) \qquad (8)$$

donde $\mathbf{F}^*(x)$ denota una familia de densidades específica; en este caso se trata de la función de densidad Gumbel y la DVEG.

Las densidades que se analizan en esta investigación son del tipo localidad y escala (Gutiérrez-González, Panteleeva, & Córdoba-Lobo, 2012) cuando se fija un valor para el parámetro de forma. Así, con base en la invarianza bajo la transformación de los parámetros de localidad y escala, se propone una prueba de bondad de ajuste *bootstrap* paramétrico basada en el coeficiente de correlación muestral, como

• ISSN 2007-2422

una estadística de prueba. Una prueba similar a ésta para la distribución log-gamma generalizada fue presentada por Gutiérrez-González, Villaseñor-Alva, Panteleeva y Vaquera-Huerta (2013).

Si H_0 de (8) se cumple, entonces la distribución de $f(x)$ es tal que $F(x;\mu,\sigma,\varepsilon)=F_*\left(\frac{x-\mu}{\sigma};\varepsilon\right)$. Entonces, para una variable aleatoria X con función de densidad $f(x)$, se tiene que la función $F_*(x;\varepsilon)$ le corresponde su función inversa $F_*^{-1}(y;\varepsilon)$ en y.

Sean $X_{(1)},\ldots, X_{(n)}$ las estadísticas de orden de una variable aleatoria, entonces la función de distribución empírica correspondiente está dada por:

$$F_n(x)=\begin{cases}0 & \text{si} \quad x<x_{(1)}\\ \dfrac{i+0.5}{n_1} & \text{si} \quad x_{(i)}\le x<x_{(i+1)}\\ 1 & \text{si} \quad x>x_{(n)}\end{cases}$$

donde $x_{(i)}$ es el valor de la i-ésima estadística de orden.

Por el teorema de Glivenko-Cantelli se establece una convergencia casi segura, cuando $n\to\infty$, entre la distribución empírica $F_n(x)$ y la distribución teórica, que puede ser $F(x)$ o $G(x)$; por lo tanto, es factible establecer para la DVEG una aproximación:

$$G_n(x)\approx G(x)\Rightarrow \frac{1}{\varepsilon}\left[-\log\left[G_n(x)\right]\right]^{-\varepsilon}-\frac{1}{\varepsilon}\approx\frac{1}{\sigma}x-\frac{\mu}{\sigma}$$

Similarmente, para la distribución Gumbel resulta:

$$F_n(x)\approx F(x)\Rightarrow \log\left\{-\log\left[F_n(x)\right]\right\}\approx-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$$

Ambas expresiones se pueden reescribir como $Y=\beta+\alpha Z$ y se espera que bajo H_0 exista una fuerte relación lineal entre Y y Z cuando se sustituye al parámetro ε por un estimador consistente ($\hat{\varepsilon}$). Entonces, para probar el contraste de hipótesis de (8), se propone como estadística de prueba al coeficiente de correlación muestral dado en (7), en el cual se espera que bajo H_0 la distribución de $r_n(\mathbf{Y},\mathbf{Z})$ estará concentrada en las proximidades de 1. Por tanto, la regla de decisión para una prueba de tamaño α, con $\alpha\in(0,1)$, un valor conocido, consiste en rechazar H_0 cuando $r_n(\mathbf{Y},\mathbf{Z})<r_\alpha$.

La prueba *bootstrap* con base en los EMV se realiza siguiendo los siguientes pasos:

1. Dadas las observaciones $x_1,\ldots x_n$, calcular un valor para el estimador de ε, denotado por $\tilde{\varepsilon}_0$.
2. Con las observaciones se calcula su coeficiente de correlación muestral r_0.
3. A partir de $\tilde{\varepsilon}_0$ iniciar un ciclo *bootstrap*.
   a) Generar una muestra *bootstrap* de tamaño n de la DVEG o la distribución Gumbel, según el caso.
   b) Con la muestra del inciso (3a) calcular una estimación para el parámetro de forma, denotándola por $\tilde{\varepsilon}_1$.
   c) Con $\tilde{\varepsilon}_1$ del inciso (3b) se calcula el coeficiente de correlación muestral $\hat{r}_1$.
4. El ciclo de *bootstrap* del inciso 3 se repite m veces para calcular, $\hat{r}_1,\ldots, \hat{r}_m$, en donde m-cantidad de estimaciones de *bootstrap*, para determinar el cuantil *bootstrap*.
5. Con el ciclo terminado, $\hat{r}_1, \ldots, \hat{r}_m$ son ordenados en forma no decreciente, denotándolos con $\hat{r}_i$. Entonces, $\hat{r}_1\le\hat{r}_2\le\cdots\le\hat{r}_m$ y obtener el cuantil α, sea éste $\hat{r}_\alpha$.
6. Regla de decisión. Comparar r_0 con el cuantil α del paso 5.
   a) Si $r_0\le\hat{r}_\alpha$, se rechaza H_0 al nivel de significancia α.
   b) Si $r_0>\hat{r}_\alpha$, no se rechaza H_0 al nivel de significancia α.

Antes de iniciar con las pruebas, se determina si éstas conservan el tamaño nominal de la prueba y presentan buenas potencias.

Los resultados de los tamaños de la prueba para 10 000 réplicas de ambas distribuciones se muestran en el cuadro 1. Se puede concluir que la prueba *bootstrap* conserva el tamaño nominal de la prueba para las distribuciones Gumbel y VEG.

ISSN 2007-2422

Cuadro 1. Tamaños de prueba para la DVEG y la distribución Gumbel.

	DVEG con ε = 0.1					DVEG con ε = 0.5					Distribución Gumbel				
n	0.010	0.025	0.050	0.075	0.100	0.010	0.025	0.050	0.075	0.100	0.010	0.025	0.050	0.075	0.100
30	0.012	0.026	0.040	0.060	0.086	0.004	0.011	0.039	0.059	0.084	0.008	0.023	0.039	0.060	0.082
50	0.008	0.016	0.030	0.046	0.064	0.004	0.012	0.038	0.063	0.095	0.010	0.030	0.055	0.080	0.100
75	0.002	0.010	0.020	0.036	0.050	0.006	0.018	0.038	0.058	0.086	0.012	0.021	0.043	0.069	0.097
100	0.004	0.016	0.026	0.046	0.062	0.006	0.018	0.041	0.059	0.085	0.010	0.018	0.046	0.078	0.100
150	0.004	0.010	0.044	0.058	0.070	0.007	0.020	0.046	0.069	0.096	0.011	0.029	0.053	0.077	0.104

En el caso de la potencia de la prueba se utilizan tres diferentes distribuciones alternativas: normal estándar, *t-Student* con 4 gl y Cauchy (0.2). Los resultados para 10 000 réplicas se muestran en el cuadro 2.

Periodos de retorno

Para el análisis del factor peligro es de interés conocer el tiempo promedio de espera para que ocurra una lluvia extrema que pudiera causar algún problema de inundación. El periodo de retorno es el tiempo medio para que se repita un evento semejante. Entonces sea X_1, X_2, ... una sucesión de variables aleatorias *iid* con función de distribución continua F y $\mu \in \mathbb{R}$. Considerando $\{X_i > u\}$ un evento extremo, se define el tiempo de la primera excedencia como $T(u) = \min\{i \geq 1: X_i > u\}$. Con esto, el tiempo promedio de espera para que ocurra un evento

Cuadro 2. Potencia de la prueba para la DVEG.

n	α	Alternativa		
		Normal (0.1)	*t-Student* (4)	Cauchy (0.2)
30	0.010	0.376	0.398	0.658
	0.050	0.662	0.610	0.824
	0.075	0.734	0.660	0.862
	0.100	0.774	0.704	0.882
50	0.010	0.534	0.396	0.884
	0.050	0.850	0.704	0.964
	0.075	0.900	0.782	0.976
	0.100	0.924	0.814	0.981
75	0.010	0.536	0.420	0.960
	0.050	0.930	0.790	0.996
	0.075	0.956	0.856	0.998
	0.100	0.964	0.892	1.000
100	0.010	0.552	0.604	1.000
	0.050	0.976	0.862	1.000
	0.075	0.992	0.894	1.000
	0.100	0.992	0.930	1.000
150	0.010	0.574	0.781	1.000
	0.050	0.994	0.966	1.000
	0.075	0.998	0.987	1.000
	0.100	1.000	0.992	1.000

• ISSN 2007-2422

extremo es $E[T(u)$. Si la probabilidad del evento $\{X^*_i > u\}$ es p, su periodo de retorno es p^{-1}. Entonces, usando la distribución de probabilidad acumulada, para el evento $\{X_i > u\}$, el periodo de retorno se calcula con (9):

$$\tau_x = \frac{1}{1-F(x)} \tag{9}$$

En específico, el nivel de retorno asociado con el periodo de retorno p^{-1} es el $(1 - p)$-ésimo cuantil de la distribución. En el caso de la distribución Gumbel y la de VEG, el cuantil $1 - p$ está dado en (10):

$$x_p = \begin{cases} \mu - \frac{\sigma}{\varepsilon}\left[1-\left\{\log(1-p)\right\}^{-\varepsilon}\right] & \text{si } \varepsilon \neq 0 \\ \mu + \sigma\left[-\log\left\{-\log(1-p)\right\}\right] & \text{si } \varepsilon = 0 \end{cases} \tag{10}$$

Los cuantiles se calculan a partir de las estimaciones de los parámetros.

Resultados y discusión

El índice de riesgo se calcula con la fórmula (1). Para los factores de vulnerabilidad y de costo se construyen dos indicadores con base en la disposición de servicios, de los bienes con los que cuenta la población y del número de habitantes por municipio. La información fue tomada de la base de datos de INEGI, que corresponde al censo de población y vivienda 2010.

Índice de vulnerabilidad

La vulnerabilidad se compone de dos factores: social y natural. El factor social se refiere al indicador de servicios (Ind_{serv}) que se obtiene a partir de una combinación lineal de las tres variables PO_NDEE, PO_NDAE y PO_NDD. Los pesos de la combinación lineal se obtienen por CP. Con la información de las tres variables se calcula la matriz de covarianzas y de ésta, los valores propios de cada una de las variables, resultando 290.367, 6.808 y 1.228, respectivamente. Después se ponderan los valores propios. Resultan los pesos de cada una de las tres variables. Para obtener el Ind_{serv}, los resultados se muestran en el cuadro 3.

Para el factor natural se propone el indicador ríos ($In_{ríos}$), en donde se consideran los principales recursos hidrológicos con los que cuenta cada municipio. El indicador se construye ponderando el número de ríos que forman parte del municipio y la capacidad que tiene cada uno, medida por el nivel de agua máximo ordinario. Los resultados del $In_{ríos}$ se muestran en el cuadro 3.

Por último, para obtener el indicador de vulnerabilidad (In_{vuln}), se ponderaron ambos indicadores, In_{serv} e $In_{ríos}$. Los resultados se muestran en el cuadro 3.

Índice de costos

Para el análisis del factor de costo intervienen dos variables de interés. En primer lugar, se tiene el logaritmo del número de habitantes en cada municipio, esto basado principalmente en el supuesto de que a mayor población mayor riqueza. Se toma el logaritmo de la población ($\log_{pob}$) sólo para mantener una escala más apropiada. Los resultados se muestran en el cuadro 4.

La segunda variable que se toma en cuenta es un indicador de los bienes (In_{bienes}) con los que cuenta la población del municipio en estudio. Después, en la construcción de este indicador se consideraron cinco bienes que estarían expuestos a sufrir cierto daño ante una inundación y se denotan de la siguiente manera: televisión (PODT), refrigerador (PODR), lavadora (PODL), computadora (PODC), y automóvil o camioneta (PODA). En el cálculo del indicador de bienes se consideraron los porcentajes de la población que cuenta con tal o cual bien.

Para obtener una combinación lineal adecuada de estas cinco variables se realiza un análisis de CP para generar los pesos adecuados de cada variable. De forma similar al caso de los servicios, se calcula la matriz de covarianzas y

ISSN 2007-2422

Cuadro 3. Índice de vulnerabilidad.

Núm.	Municipios	In_{serv}	$In_{ríos}$	In_{vuln}	Categoría
1	Balancán	0.282	0.128	0.221	Medio
2	Cárdenas	0.403	0.785	0.556	Muy alto
3	Centla	1.000	0.161	0.664	Muy alto
4	Centro	0.000	0.957	0.526	Muy alto
5	Comalcalco	0.242	0.552	0.366	Alto
6	Cunduacán	0.531	0.785	0.632	Muy alto
7	E. Zapata	0.001	0.161	0.065	Bajo
8	Huimanguillo	0.810	0.101	0.526	Muy alto
9	Jalapa	0.123	0.827	0.405	Alto
10	Jalpa	0.166	0.684	0.373	Alto
11	Jonuta	0.123	0.161	0.138	Bajo
12	Macuspana	0.496	0.665	0.564	Muy alto
13	Nacajuca	0.016	0.392	0.166	Bajo
14	Paraíso	0.112	1.000	0.467	Alto
15	Tacotalpa	0.367	0.000	0.220	Medio
16	Teapa	0.166	0.060	0.124	Bajo
17	Tenosique	0.256	0.161	0.218	Bajo

Cuadro 4. Índice de costo.

Núm.	Municipios	$\log_{pob}$	In_{bienes}	In_{costo}
1	Balancán	4.754	0.274	2.514
2	Cárdenas	5.395	0.514	2.955
3	Centla	5.009	0.238	2.624
4	Centro	5.806	1.000	3.403
5	Comalcalco	5.285	0.447	2.866
6	Cunduacán	5.102	0.412	2.757
7	E. Zapata	4.470	0.672	2.571
8	Huimanguillo	5.254	0.286	2.770
9	Jalapa	4.561	0.593	2.577
10	Jalpa	4.921	0.546	2.734
11	Jonuta	4.470	0.156	2.313
12	Macuspana	5.185	0.428	2.806
13	Nacajuca	5.061	0.742	2.901
14	Paraíso	4.938	0.702	2.820
15	Tacotalpa	4.666	0.000	2.333
16	Teapa	4.729	0.400	2.564
17	Tenosique	4.771	0.421	2.596

• ISSN 2007-2422

se calculan los valores propios para las cinco variables mencionadas arriba, obteniendo 243.062, 17.619, 5.178, 3.471 y 1.405, respectivamente. Realizando una ponderación a partir de los valores propios, resultan los pesos de cada una de las cinco variables. Los resultados se muestran en el cuadro 4.

Por último, para obtener el indicador de costo (In_{costo}), se hace una ponderación de los factores $\log_{pob}$ y In_{bienes} que influyen en este indicador. Cabe mencionar que no existe alguna razón relevante para darle mayor peso a un factor en particular, entonces se restringe a ponderar con el mismo peso a ambos factores, es decir, 0.5 para los dos. Los resultados se muestran en el cuadro 4.

Factor peligro

Obtención de la información

Para calcular los índices de peligro, la información de precipitación se obtuvo de las mediciones proporcionadas en la base de datos que el Servicio Meteorológico Nacional maneja con la herramienta *CLICOM*, desde 1961 hasta 2000, en su versión interpolada en malla regular de 0.2 grados de longitud por 0.2 grados de latitud (la denominada *Maya* v. 1.0). La información proviene de algo más de 5 000 estaciones climatológicas de la base de datos. La información más reciente (2001-2007) proviene de las mediciones diarias del subconjunto de estaciones climatológicas que reporta en tiempo casi real; estos datos fueron obtenidos con base en su longitud y latitud.

Los datos utilizados son los de precipitación pluvial y en la presentación de nodo por nodo. Lo que se tiene es una lista de 4 542 archivos de texto en donde cada uno de éstos corresponde a un nodo y cada archivo contiene una serie de datos de precipitación pluvial desde enero de 1961 hasta diciembre de 2000. Además de esta información, se conoce la precipitación de 2001 a 2007 de las estaciones existentes en la república mexicana. Se cuenta con un archivo por año con cada uno con los siguientes campos: latitud, longitud, clave y nombre de la estación, altura, mes y días. Para aprovechar la información extra se trabajó con las estaciones que rodean al nodo. Con cada nodo que se encuentra involucrado en el análisis se calcula un valor máximo de precipitación de 2001 a 2007 y se obtiene la precipitación que corresponde al nodo de interés.

Los nodos de interés son los que intervienen en cada municipio. Para esto se localizan las cuencas que conforman al estado de Tabasco. La mayor parte de la superficie del estado (75.22%) se ubica en la Región Hidrográfica número 30, o Región del Sistema Grijalva-Usumacinta, formada por las cuencas hidrográficas del Grijalva, Usumacinta y de la laguna de Términos, que en Tabasco ocupan el 41.45, 29.24 y 4.53%, respectivamente. Mientras que el 24.78% restante se encuentra dentro de la Región Hidrográfica número 29 o Región del Coatzacoalcos, formada por dos cuencas: la del Coatzacoalcos, Tonalá y lagunas del Carmen, y la Machona, siendo esta última la única que tiene representación en el estado. Ambas regiones están consideradas como las más húmedas del país, en primer y segundo lugar, respectivamente.

Con base en la información que se conoce de vulnerabilidad y costo se trabaja por municipio. Entonces, para obtener los datos de precipitación en cada municipio se utilizó la información de las subcuencas que forman parte de cada uno de éstos, ya sea que se encuentre completamente solo o como parte de ella, y se toman en cuenta aquellas cuya aportación de su caudal influye en el municipio de estudio.

Análisis de la información

En el análisis de los datos se requiere de una serie de observaciones para cada municipio, pero en este caso se tienen tantas series como el número de nodos que se involucren. Entonces, para obtener una sola serie se realiza una combinación lineal que resulte adecuada de los nodos que entran en el municipio. Para tener la mejor combinación lineal, se utiliza CP con los nodos de cada municipio, esto proporcionará la serie final de los datos de precipitación del municipio de interés.

ISSN 2007-2422

Para el factor peligro, a los datos de precipitación se les extrajeron los máximos anuales a los que se ajustaron la distribución Gumbel y de VEG; en ambas se realizó una estimación puntual y por intervalos. Se consideraron los tres criterios mencionados en la sección anterior y se eligió el modelo en el que dos o más criterios le favorecieran para modelar el municipio de interés.

En los cuadros 5 y 6 se muestran los resultados de las estimaciones y en la figura 1, las gráficas correspondientes al municipio de Balancán, Tabasco. La misma estimación se realizó para los 16 municipios restantes. En el cuadro 7 se ejemplifican con cuatro municipios los modelos elegidos.

Una vez obtenidos los modelos para los 17 municipios, se calculan sus respectivos periodos de retorno. En el cuadro 8 se muestran los resultados bajo cuatro escenarios de peligro: 100, 150, 200 y 250 mm. Por ejemplo, para Balancán se tiene que el tiempo promedio para que ocurra una lluvia mayor o igual a 150 mm es de 3.5 años.

Finalmente, con los resultados de los tres factores se construye el Índice de Riesgo de Inundación; en el peligro se toma la probabilidad p del evento $\{X_i > x\}$, donde $x = 150$ mm, ya que la experiencia sugiere que a partir de este valor se han presentado problemas de inundación. Los resultados se muestran en el cuadro 9 y en la figura 2 se tiene el mapa de riesgo de inundación.

Cuadro 5. Estimación de parámetros.

Estimación de parámetros, Balancán						
Distribución	**Escala**	**Forma**	**Localidad**	**Log-veros**	**AIC**	**Correlación**
VEG	27.840	0.129	117.294	-234.053	474.106	0.974
Gumbel	29.368	.	119.298	-234.831	473.662	0.972

Cuadro 6. Intervalos de confianza.

IC	VEG	Gumbel
Escala	(21.002, 34.678)	(27.172, 31.564)
Forma	(-0.092, 0.351)	.
Localidad	(108.315, 126.274)	(110.456, 128.139)

Cuadro 7. Modelos elegidos por municipio.

Municipio	Modelo elegido
Balancán	$F(x) = \exp\left\{-\left[1+0.129\left(\frac{x-117.294}{27.84}\right)\right]^{-\frac{1}{0.129}}\right\}$
Centro	$G(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{x-142.057}{30.375}\right)\right]\right\}$
Huimanguillo	$G(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{x-163.261}{53.403}\right)\right]\right\}$
Tenosique	$F(x) = \exp\left\{-\left[1+0.282\left(\frac{x-91.188}{29.447}\right)\right]^{-\frac{1}{0.282}}\right\}$

• ISSN 2007-2422

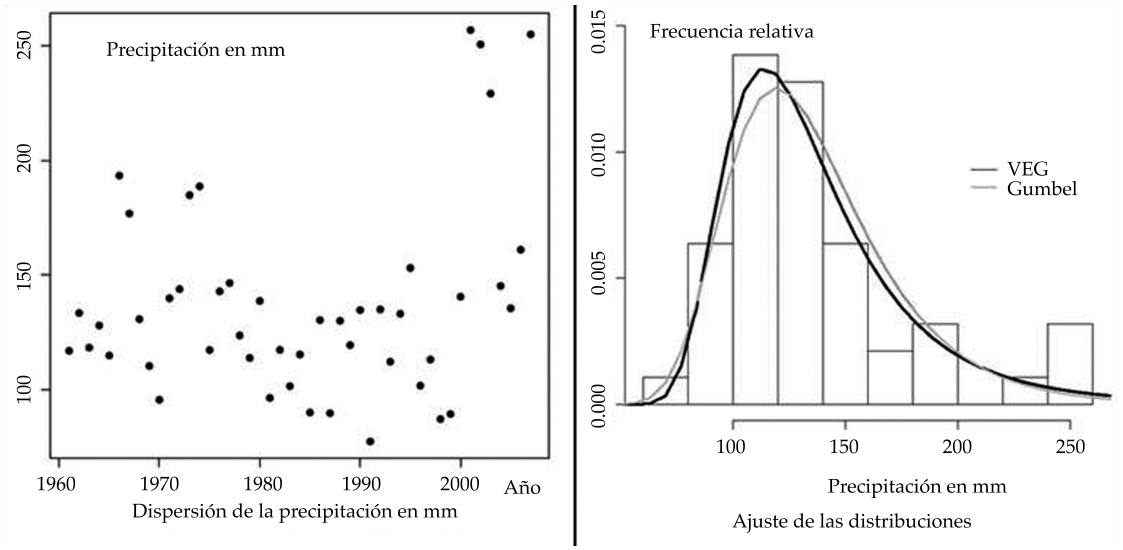


Figura 1. Gráficas de la estimación para el municipio de Balancán.

Cuadro 8. Periodos de retorno por municipio.

Municipio	Periodos de retorno			
	100 mm	150 mm	200 mm	250 mm
Balancán	1.174	3.513	12.860	41.492
Cárdenas	1.206	3.370	14.765	72.082
Centla	1.094	2.674	8.852	27.072
Centro	1.019	1.862	7.249	35.443
Comalcalco	1.437	4.150	13.180	38.315
Cunduacán	1.241	2.954	10.099	38.515
E. Zapata	1.038	2.077	6.397	19.303
Huimanguillo	1.035	1.359	2.460	5.405
Jalapa	1.018	1.745	6.122	27.262
Jalpa	1.109	2.328	7.870	30.891
Jonuta	1.112	3.104	11.265	36.163
Macuspana	1.205	3.364	12.205	41.889
Nacajuca	1.112	2.303	7.594	29.071
Paraíso	1.049	2.843	16.789	115.446
Tacotalpa	1.065	1.410	2.518	5.785
Teapa	1.054	1.434	2.623	5.702
Tenosique	1.295	2.191	13.073	27.014

Discusión de resultados

La prueba de bondad de ajuste *boostrap* propuesta conserva los valores nominales del tamaño de la prueba y las potencias bastante altas, lo que la hace una mejor prueba para las DVEG que la presentada por Campos-Aranda (2001). En investigaciones previas sobre lluvias se tienen trabajos que abarcan sólo los valores históricos (González-Camacho, Pérez-Rodríguez, &

ISSN 2007-2422

Cuadro 9. Índice de riesgo propuesto.

Núm.	Municipios	*C*	*V*	P150	IR	Categoría
1	Balancán	2.514	0.221	0.285	0.158	Bajo
2	Cárdenas	2.955	0.556	0.290	0.487	Medio
3	Centla	2.624	0.664	0.374	0.652	Alto
4	Centro	3.403	0.526	0.345	0.962	Muy alto
5	Comalcalco	2.866	0.366	0.241	0.253	Medio
6	Cunduacán	2.757	0.632	0.316	0.590	Alto
7	E. Zapata	2.571	0.065	0.481	0.080	Bajo
8	Huimanguillo	2.770	0.526	0.718	1.000	Muy alto
9	Jalapa	2.577	0.405	0.555	0.580	Alto
10	Jalpa	2.734	0.373	0.421	0.438	Medio
11	Jonuta	2.313	0.138	0.322	0.103	Bajo
12	Macuspana	2.806	0.564	0.297	0.470	Medio
13	Nacajuca	2.901	0.166	0.425	0.210	Bajo
14	Paraíso	2.820	0.467	0.241	0.463	Medio
15	Tacotalpa	2.333	0.220	0.682	0.364	Medio
16	Teapa	2.564	0.124	0.680	0.221	Bajo
17	Tenosique	2.596	0.218	0.481	0.258	Medio

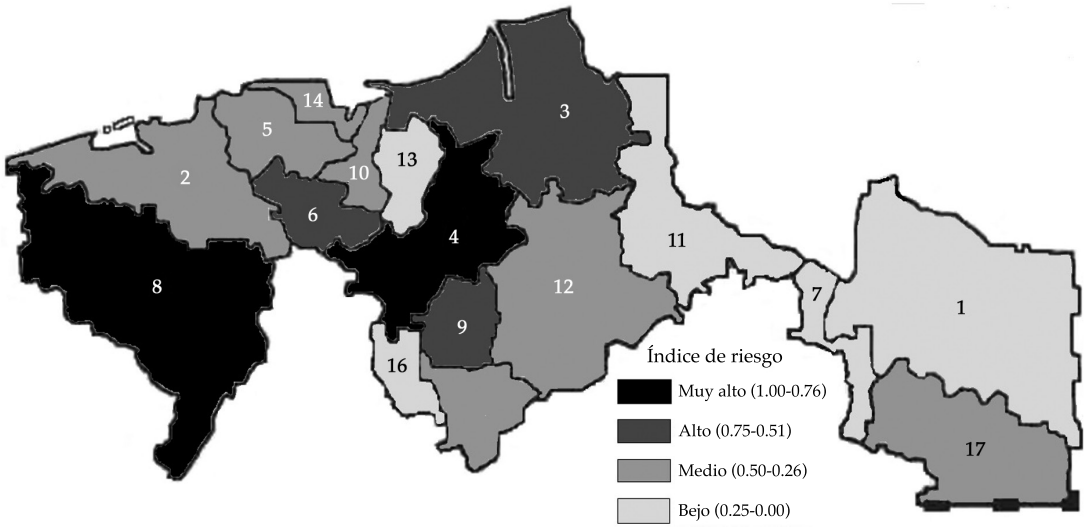


Figura 2. Mapa del índice de riesgo propuesto.

Ruelle, 2011), (Coronel-Brizio & Llanos-Arias, 1996; Díaz-Delgado, Bâ, & Trujillo-Flores, 1999); similarmente, para la vulnerabilidad existen trabajos que se relacionan con este factor (Green *et al*., 1994) y lo mismo para el de costos en zonas habitacionales (Baró-Suárez, Díaz-Delgado, Calderón-Aragón, Esteller-Alberich, & Cadena-Vargas, 2011). En la investigación hecha para el riesgo de inundaciones, el índice propuesto está basado en el ACP e incluye todas las variables

• ISSN 2007-2422

sobre las que se tiene información, agrupadas en los tres factores mencionados (Ordaz, 1996), proporcionando de esta forma una medida más confiable para monitorear el riesgo por inundación en los 17 municipios del estado de Tabasco.

Conclusiones

El mapa de riesgo obtenido fue contrastado con los resultados históricos sobre desastres por inundación en los 17 municipios de Tabasco. Los resultados obtenidos fueron acordes con los registros de inundaciones en los años 1982, 1989, 1995, 1998, 2002, 2003, y de 2005 a 2009. En el cuadro 10 se muestra el comparativo del índice de riesgo propuesto (IRP) y los registros de inundación en los años mencionados (IH).

En algunos municipios no coincide, esto se puede deber a que no se encontraron los registros de todos los municipios que presentaron problemas de inundación o que faltó considerar algunos otros factores que podrían aumentar el grado de vulnerabilidad o de costo.

Finalmente, se puede concluir que en general los factores incluidos en la construcción del índice fueron correctos, así como el uso de componentes principales para obtener las ponderaciones adecuadas para cada uno de los factores considerados.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la LP-15 del Colegio de Postgraduados y de la LGAC-2 de la MII de la SEPI-UPIICSA-IPN para esta investigación, así como a la Comisión Nacional de Agua por la información sobre la precipitación de lluvias y los mapas de las regiones hidrográficas utilizadas.

Referencias

Arreguín-Cortés, F. I., Rubio-Gutiérrez, H., Domínguez-Mora, R., & Luna-Cruz, F. (abril-junio de 2014). Análisis de las inundaciones en la planicie tabasqueña en el periodo 1995-2010. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *5*(3), 5-32.

Baró-Suárez, J. E., Díaz-Delgado, C., Calderón-Aragón, G., Esteller-Alberich, M., & Cadena-Vargas, E. (julio-septiembre de 2011). Costo más probable de daños por inundación en zonas habitacionales de México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(3), 201-218.

Bayliss, A., & Reed, D. (2001). *The Use of Hisorical Data in Flood Frequency Estimation*. Center for Ecology and Hidrology. Wallingford, England: MAFF.

Blaikie, P., Wisner, B., Cannon, T., & Davis, I. (1994). *At Risk. Natural Hazards, People´S Vulnerability and Disasters*. New York: Routledge.

Campos-Aranda, D. F. (2001). Contraste de cinco métodos de ajuste de la distribución GVE en 31 registros históricos de eventos máximos anuales. *Ingeniería Hidráulica en México*, *7*(2), 77-92.

Cenapred (2006). *Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos*. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Coles, S. (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. London: Great Britain Springer-Verlag.

Coles, S., & Dixon, M. (1999). Likelihood-Based Inference for Extreme Values Models Extremes. *Journal of the Royal Statistical Society*, *2*(1), 5-23.

Coronel-Brizio, H. F., & Llanos-Arias, J. (1996). Sobre el ajuste de la distribución Gamma a datos de precipitación pluvial. *Ingeniería Hidráulica en México*, *11*(1), 15-20.

Díaz-Delgado, C., Bâ, K. M., & Trujillo-Flores, E. (1999). Las funciones Beta-Jacobi y Gamma-Laguerre como métodos de análisis de valores hidrológicos extremos. Caso de precipitaciones máximas anuales. *Ingeniería Hidráulica en México*, *14*(2), 39-48.

Duncan, W. (2002). Reinforcing Flood-Risk Estimation. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *360*(1796), 1373-1387. DOI: 10.1098/rsta.2002.1005.

Fisher, R., & Tippett, L. (1928). Limiting Forms of the Frequency Distribution of the Largest or Smallest

Cuadro 10. Comparativo del índice de riesgo propuesto contra los registros históricos.

Mun.	**Balancán**	**Cárdenas**	**Centla**	**Centro**	**Comalcalco**	**Cunduacán**	**E. Zapata**	**Huimanguillo**	**Jalapa**
IH	Bajo	Alto	Alto	Muy Alto	Alto	Alto	Bajo	Alto	Alto
IRP	Bajo	Medio	Alto	Alto	Medio	Alto	Bajo	Muy alto	Alto
Mun.	**Jalpa**	**Jonuta**	**Macuspana**	**Nacajuca**	**Paraíso**	**Tacotalpa**	**Teapa**	**Tenosique**	
IH	Medio	Bajo	Medio	Medio	Medio	Bajo	Bajo	Medio	
IRP	Medio	Bajo	Medio	Bajo	Medio	Medio	Bajo	Medio	

ISSN 2007-2422

Memeber of a Sample. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, *24*, 180-190.

Flowers-Cano, R. S., Jeffrey-Flowers, R., & Rivera-Trejo, F. (septiembre-octubre de 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.

Gnedenko, B. (1943). Sur la distribution limite du terme maximum d`une serie aleatoire. *The Annals of Mathematics*, *44*(3), 423-453.

González-Camacho, J. M., Pérez-Rodríguez, P., & Ruelle, P. (octubre-diciembre de 2011). Estimación de índices normalizados de lluvia mediante la distribución gamma generalizada extendida. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *2*(4), 65-76.

Green, C., Van Der Veen, A., Wiertra, E., & Penning Rowsell, E. (1994). *Vunerability Refined: Analysing Full Flood Impacts*. London: Middlesex University Press.

Gumbel, E. (1934). Les moments des distribution limite du terme maximum dùne sèrie alèatoire. *Annals Mathematics*, *198*(1), 141-143.

Gumbel, E. (1958). *Statistical of Extremes*. New York: Columbia Univ. Press.

Gutiérrez-González, E., Panteleeva, O. V., & Córdoba-Lobo, V. M. (2012). Maximum Likelihood Estimators for the Parameters of a Distribution Extended Log-Loc-Scale Class. *Far East Journal of Theoretical Statistics*, *40*(2), 127-143.

Gutiérrez-González, E., Villaseñor-Alva, J. A., Panteleeva, O. V., & Vaquera-Huerta, H. (2013). On Testing the Log-Gamma Distribution Hypothesis. *Computational Statistics*, *28*(6), 2761-2776.

Herrera-Díaz, I., Rodríguez-Cuevas, C., Couder-Castañeda, C., & Gasca-Tirado, J. R. (enero-febrero de 2015). Modelación numérica hidrodinámico-hidrológica en zonas de inundación con presencia de infraestructura. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *6*(1), 139-152.

Hunt, J. (2002). Floods in a Changing Climate: A Review. *Philosophical Transaction*, *360*(1796), 1531-1543.

Jenkinson, A. (1955). The Frequency Distribution of the Annual Maximum (or Minimum) Values of Meteorological Elements. *Quart. J. Roy. Meteo. Soc.*, *81*, 158-171.

Lehner, B., & Döll, P. (2001). Europe´s Flood Today and in the Future. Model-Based Assessment of European Water Resources and Hidrology in the Face of Global Change. *Center for Envioromental Sistems Research, University of Kassel*, *5*, 6.1-6.14.

Merz, B., Thieken, A., & Gocht, M. (2007). *Flood Risk Management in Europe: Innovation in Policy and Practice*. S. S. Begum (Ed.). Berlin: Springer.

Mileti, D. (1999). *Disasters by Design. A Reassessment of Natural Hazard in the United States*. Washington, DC: Joseph Henry Press.

Ordaz, M. (1996). Algunos conceptos del análisis de riesgo. *Cenapred*, *14*, 6-12.

Rivera-Trejo, F., Soto-Cortés, G., & Barajas-Fernández, J. (octubre-diciembre de 2009). La inundación de 2007 en Tabasco, México: evolución de niveles de agua. *Ingeniería Hidráulica en México*, *24*(4), 159-166.

Rosbjerg, D., & Madsen, H. (1996). The Role of Regional Information in Estimation of Extreme Point Rainfall. *Atmos. Res*., *42*, 113-122.

Smith, R. (2001). Flood Damage Estimation. A Review of Urban Stage-Damage Curves and Loss Function. *Water S.A*., *20*, 231-238.

Tapsell, S., Penning-Rowsell, S., & Tunstall, T. (2002). Vulnerability to Flooding: Health and Social Dimensions. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical an Engineering Sciences*, *360*, 1511-1525.

Tawatchi, T., & Mohammed, F. (2005). Flood Hazard and Risk Analysis in the Southwest Region of Bangladesh. *Hydrological Processes*, *19*, 2055-2069.

Tawn, J. (1992). Estimating Probabilitis of Extreme Sea-Levels. *Journal of the Royal Statistical Society*, *41*(1), 77-93.

Uribe-Alcántara, E. M., Montes-León, M. A., & García-Celis, E. (abril-junio de 2010). Mapa Nacional de Índice de Inundación. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *1*(2), 73-85.

Von Mises, R. (1936). La distribution de la plus grande de *n* valeurs. *Revue Mathématique de lÚnion Interbalkanique*, *1*, 141-160.

Young, P. (2002). Advances in Real Time Flood Forecasting. *Philosophical Transaction: Mathematical, Physical an Engineering Sciences*, *360*(1796), 1433-1450.

Zucarelli, G. V. (noviembre-diciembre de 2013). Identificación de eventos hídricos extremos en la cuenca del río Paraná. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *4*(5), 181-187.

Dirección institucional de los autores

M.C. Ana Laura Reyes Olvera

Colegio de Postgraduados
Posgrado en Socioeconomía, Estadística e informática
Campus Montecillo
Km 36.5 carretera federal México-Texcoco
56230 Montecillo, Texcoco, Estado de México, México
Teléfono: +52 (55) 5804 5900, extensión 1425
mala_986@hotmail.com

Dr. Eduardo Gutiérrez González

Instituto Politécnico Nacional
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación
Av. Te 950 Delegación Iztacalco Col. Granjas México
08400, Ciudad de México, México
Teléfono: +52 (55) 5624 2000, extensión 70276

• ISSN 2007-2422

Haga clic aquí para escribir al autor

Relaciones entre parámetros de los modelos de infiltración de Kostiakov y Lewis-Kostiakov, Córdoba, Argentina

• Juan Francisco Weber* • Laureana Apestegui •
Universidad Tecnológica Nacional, Argentina
*Autor de correspondencia

Abstract

Weber, J. F., & Apestegui, L. (marzo-abril, 2016). Relaciones entre parámetros de los modelos de infiltración de Kostiakov y Lewis-Kostiakov - Córdoba, Argentina. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *7*(2), 115-132.

Se presentan ciertas relaciones halladas entre los parámetros del modelo de infiltración de Lewis-Kostiakov, calibrados a partir de los resultados obtenidos en una campaña de medición in situ en la ciudad de Córdoba, Argentina. Como instrumento se utilizó un microsimulador de lluvia portátil diseñado y construido por este grupo de trabajo, como alternativa superadora al infiltrómetro de doble anillo. Este equipo, que es completamente desarmable y define una parcela de ensayo de 1 m^2, permite generar lluvias de intensidades comprendidas entre los 65 y 120 mm/h. La selección de los sitios de ensayo respondió al tipo y uso del suelo. A su vez, se consideraron distintas condiciones de humedad inicial. La campaña de medición se extendió durante siete meses, realizando entre dos y tres ensayos por semana. Los valores medidos fueron digitalizados y procesados, construyéndose las curvas de infiltración acumulada y tasa de infiltración en función del tiempo. A partir de estos valores, se ajustaron los parámetros del modelo de infiltración de Kostiakov y de Lewis-Kostiakov (Mecenzev), que en sí mismos representan un aporte original al conocimiento de la hidrología urbana en esta ciudad. Al graficar diversas relaciones entre parámetros, se evidencia la existencia de una función empírica, que permitiría disminuir a dos el número de parámetros del modelo de Mecenzev, con una aceptable pérdida de calidad en las predicciones. Se considera que esta relación permitirá mejorar la elección de parámetros de infiltración en tareas de diseño hidrológico urbano en Córdoba, Argentina.

Palabras clave: simulador de lluvia, mediciones hidrológicas, hidrología urbana, modelo de Lewis-Kostiakov, infiltración.

Resumen

Weber, J. F., & Apestegui, L. (March-April, 2016). Relation between the Parameters of the Kostiakov and Lewis-Kostiakov Infiltration Models, Cordoba, Argentina. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 7*(2), *115-132.*

Certain relationships between the parameters of the Lewis-Kostiakov infiltration model were found, calibrated based on the results obtained from a field measurement campaign in the city of Cordoba, Argentina. A portable rainfall micro-simulator was used as an instrument, designed and built by this workgroup as a better alternative to the double-ring infiltrometer. This equipment, which can be completely disassembled, defines a 1 m2 test plot, making it possible to generate rainfall intensities between 65 and 120 mm/h. The test sites were selected based on soil type and use. Different initial moisture conditions were considered. The measuring campaign was conducted over six months with between two and three tests per week. The values measured were digitalized and processed and accumulated infiltration curves and infiltration rates over time were generated. Based on these values, the parameters of the Kostiakov and the Lewis-Kostiakov (Mecenzev) infiltration models were fitted, which in themselves represent an original contribution to knowledge about the urban hydrology in this city. The graphing of the different relationships between the parameters indicated the existence of an empirical function which would enable reducing the number of parameters of the Mecenzev model to two, with an acceptable loss in the quality of the predictions. This relationship will improve the selection of infiltration parameters for the design of the urban hydrology in Cordoba, Argentina.

Keywords: *Rainfall simulator, hydrologic measures, urban hydrology, Lewis-Kostiakov model, infiltration.*

Recibido: 04/02/2014
Aceptado: 22/09/2015

Introducción

En trabajos ingenieriles vinculados con el diseño y cálculo de obras de desagüe pluvial urbano, el proyectista se ve en la obligación, a la hora de cuantificar los caudales de aporte, a considerar dos tipos de superficies en las cuencas: impermeables y permeables. Las primeras sin duda provocan un alto impacto en el volumen de crecidas y una disminución del tiempo de respuesta de la cuenca (Tucci, 2001). En cuanto a las segundas, es posible utilizar diversas formulaciones a la hora de cuantificar la fracción de la precipitación de escurrimiento directo y, por tanto, la fracción infiltrada, entre ellas el denominado Método Racional (Chow, Maidment, & Mays, 1994), el conocido método del CN-SCS (SCS, 1972), muy difundido en su aplicación a través de los populares programas de computadora HEC-1 (USACE, 1981), y el más moderno HEC-HMS (USACE, 2001), el método de Horton (1939), difundido en el ámbito de la hidrología computacional a través del conocido modelo SWMM (entre otros) (USEPA, 1977). Estos, como muchos otros modelos conceptuales del proceso de infiltración (Ravi & Williams, 1998), intentan simplificar el abordaje riguroso del problema, representado por la ecuación de Richards (Chow *et al*., 1994), y por tanto son los utilizados más ampliamente en la práctica hidrológica.

Una de las principales dificultades que encuentra el modelador a la hora de aplicar estos modelos de infiltración es la de estimar los parámetros de los mismos, tratando de lograr una adecuada representación de la realidad. Lamentablemente, existen grandes dificultades a la hora de disponer de datos medidos de infiltración en áreas permeables urbanas en la República Argentina. En la ciudad de Córdoba, por ejemplo, recién se encara una tarea sistemática de producción de información experimental al respecto a partir del trabajo de Weber, Urbano, Stuyck, Azelart y Martínez (2005), desde el Laboratorio de Hidráulica (LH-UTN), dependiente del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Córdoba de la Universidad Tecnológica Nacional, a través de una campaña de obtención de datos experimentales de infiltración en suelos de la ciudad de Córdoba, a través de la técnica del infiltrómetro de doble anillo. Este procedimiento de ensayo, también conocido como método de Müntz (Custodio & Llamas, 1976), permite obtener mediciones directas de infiltración en áreas reducidas (puntuales). Son conocidas las severas limitaciones que presentan las mediciones así determinadas, en particular en relación con la falta de representatividad del proceso lluvioso en la técnica de ensayo, por un lado, y a la fuerte alteración de la superficie del terreno debido al hincado de los anillos, por el otro. Estas limitaciones conllevan a errores experimentales difíciles de cuantificar.

Con el objetivo de obtener una caracterización experimental más verosímil del proceso hidrológico de la infiltración, se propuso utilizar como instrumento de ensayo un simulador de lluvia portátil desarrollado en el LH-UTN; se visualizan como beneficios inmediatos la mejor simulación del proceso lluvia-infiltración y la menor alteración de la parcela de ensayo; es decir, se intentan subsanar las limitaciones del procedimiento del infiltrómetro de doble anillo anteriormente utilizado.

Objetivos

El objetivo general de esta línea de trabajo es la caracterización del proceso de infiltración en las áreas permeables de la ciudad de Córdoba, Argentina.

En particular, en este trabajo se propone como objetivo la determinación de los parámetros de los modelos de Kostiakov y de Lewis-Kostiakov (Mecenzev) (Ravi & Williams, 1998) para estas áreas, atendiendo a características como el uso y tipo de suelo, y con base en las observaciones experimentales obtenidas mediante el uso de un simulador de lluvia; así como explorar posibles relaciones entre estos valores, con el fin de reducir el número de parámetros y por tanto facilitar su selección en tareas de diseño hidrológico urbano. Cabe destacar que para estos mismos datos experimentales, el grupo de trabajo ha determinado los parámetros de otros modelos de infiltración, como Horton (Weber,

• ISSN 2007-2422

2014a), Green-Ampt (Weber & Apestegui, 2013), Philip (Weber, 2015a) y CN-SCS (Weber, 2014b), los cuales no son motivo del presente trabajo.

Metodología

El aparato simulador de lluvia

Se describen a continuación las características generales del equipo usado en el desarrollo de la presente campaña de medición (Weber, Paoli, & Apestegui, 2009, 2010).

El microsimulador de lluvia tiene la ventaja de reproducir con más fidelidad el fenómeno de la precipitación. Numerosos autores (Marelli, 1989) muestran la importancia del impacto de las gotas en la microcapa superior del suelo en el balance hídrico, además del efecto evidente sobre la erosión superficial. Por otra parte, en este tipo de dispositivos es posible simular una precipitación de intensidad variable en el tiempo, incluso una precipitación discontinua. La necesidad de reproducir bajo condiciones controladas los efectos de la precipitación, y en especial el impacto de las gotas de lluvia sobre las propiedades físicas del suelo superficial, y las consecuencias que ello provoca en la infiltración, escorrentía y erosión, condujeron desde hace años al desarrollo de diferentes mecanismos e instrumentos que tratan de simular la lluvia natural (Pla-Sentis, 1981; Rostagno & Garayzar, 1995). El mayor de estos problemas recae sobre la reproducción de gotas que se asemejen a las de una lluvia natural.

El formador de gotas utilizado se compone de una aguja hipodérmica de 2 pulgadas de longitud y 0.8 mm de diámetros interno, introducida en tubo rígido, el cual se obtiene de cortar su propio estuche, al ras de dicha aguja. Se decidió colocar un total de 289 formadores, distribuidos en 17 filas por 17 columnas, y separados a una distancia de 5.30 cm entre ejes, cubriendo de esta manera cada formador un área aproximada de 28.10 cm^2 sobre la base de una batea de 96 x 96 cm de lado.

El equipo (figura 1) consta básicamente de una estructura metálica de caño de acero de sección cuadrada, formando un prisma cuadrado de 2 m de altura y 1 m de lado. Este prisma se forma a través de cuatro columnas y cerrado por medio de cortinas rompevientos. Las columnas sostienen el sistema de alimentación de agua que está compuesto por dos tanques: uno de alimentación, solamente, y el otro de alimentación y regulación de intensidad. La regulación de la intensidad se produce a través de un flotante (Achutegui, Abreu, & Páez, 1996). Debajo del sistema de alimentación de agua se encuentra la batea con los 289 formadores de gotas, que producen la lluvia simulada. La base de este prisma está constituida por un marco cuadrado de hierro de 1 m de lado y 0.10 m de altura, con vertederos en sus cuatro lados y canales para el transporte del agua escurrida. Este marco se hinca en el suelo, constituyendo así las paredes límites de la parcela de medición. El peso total del equipo armado es de 110.6 kg; el peso del fluido puede llegar hasta los 100 kg.

Figura 1. Simulador de lluvia en campaña.

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 2, marzo-abril de 2016, pp. 115-132
ISSN 0187-8336 •

Este equipo dispone de una curva de calibración empírica (la cual fue determinada a través de un proceso experimental en este laboratorio) que relaciona la carga hidráulica disponible sobre el extremo de las agujas formadoras de gota con la intensidad de lluvia generada. La ecuación de regresión obtenida entre estas dos variables, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.997$ fue:

$$i = 15.15\, h^{0.63} \qquad (1)$$

En esta ecuación, i es la intensidad de lluvia producida (en mm/h) y h es la carga (en cm) sobre los formadores. En la figura 2 se presenta gráficamente la relación obtenida.

Del análisis estadístico de los datos de calibración se pudo concluir que los valores de intensidad obtenidos a partir de la ecuación (1) tienen una incertidumbre asociada de 3 mm/h, lo cual representa un error de entre 3 y 5% de la intensidad producida.

Selección de los sitios

Al igual que en tareas previas (Weber *et al.*, 2005), para la definición de los sitios de ensayo se consideró que las dos variables a priori más influyentes sobre los resultados a obtener eran el tipo de suelo y uso del suelo. Con respecto al tipo, más que a una clasificación geotécnica, se asumió que una clasificación de características regionales resultaría con mayor representatividad hidrológica. Para ello, se fijó como criterio la clasificación de ambientes geomorfológicos desarrollada por Quintana-Salvat y Barbeito (1994). Este trabajo detectó básicamente dos ambientes diferenciados en el ejido de la ciudad de Córdoba: la planicie loessoide (correspondiente a un suelo del tipo limo arenoso, de gran cohesión en condiciones de baja humedad) y la terraza de inundación del antiguo cauce del río Suquía (primero), la cual fue a su vez clasificada por los autores citados en tres subambientes: terraza baja, media y alta, según su cercanía al actual cauce del río que atraviesa la ciudad.

En cuanto al uso del suelo, se distinguió básicamente en tres tipos fundamentales: patios y jardines de viviendas residenciales (espacios verdes con bajo tránsito); plazas, parques y paseos públicos (espacios verdes con medio tránsito); y calles no pavimentadas (calles de tierra). El principal criterio de selección se basó en la intensidad del tránsito tanto peatonal co-

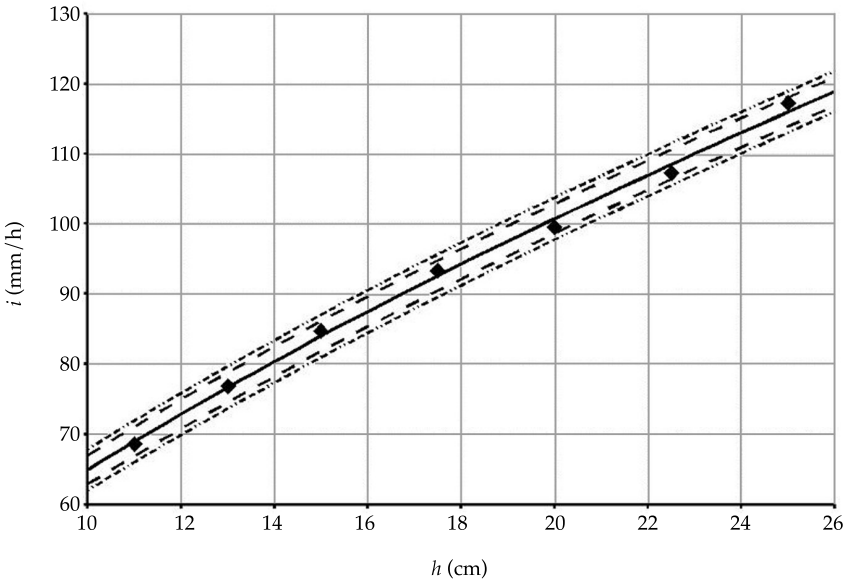


Figura 2. Curva de calibración del simulador de lluvia.

• ISSN 2007-2422

mo vehicular debido a su impacto directo en la capacidad de infiltración del suelo. Además, se agregó como punto de interés especial el lecho de una laguna de detención en la zona norte de la ciudad.

En la figura 3 se muestra el plano geomorfológico de la ciudad de Córdoba, con la indicación de los sitios seleccionados (clasificados según el uso de suelo) y los diversos ambientes geomorfológicos descritos (Weber, Apestegui, & Baldazar, 2011). Puede observarse la amplitud geográfica de la región involucrada. El cuadro 1 muestra los sitios de ensayo seleccionados clasificados según el uso del suelo y el ambiente geomorfológico. Como puede verse, no fue posible conseguir terreno disponible para realizar el ensayo correspondiente a espacios verdes de bajo tránsito en la terraza media del río Suquía debido a que este ambiente cubre un área relativamente pequeña y fuertemente urbanizada de la ciudad. En total se ensayaron 12 sitios a lo largo del ejido urbano de la ciudad.

Aplicación del simulador de lluvia

En cada uno de los sitios seleccionados se realizaron tres ensayos con el simulador de lluvia bajo intensidades relativamente constantes (del orden de los 70 mm/h) con diferentes condiciones iniciales de humedad, las cuales fueron obtenidas bien por las condiciones climáticas imperantes o porque los terrenos fueron humedecidos (regados) previamente a partir de condiciones secas. Además, en la mayoría de los sitios se realizó de modo simultáneo el ensayo clásico de infiltración mediante el infiltrómetro de doble anillo, como control y contraste de las mediciones efectuadas. La campaña de medición se extendió durante siete meses e implicó el trabajo de tres personas en forma simultánea, realizando entre dos y tres ensayos por semana.

La duración de los ensayos fue variable, comprendida en general entre 1.5 y 2 h, dependiendo del comportamiento observado in situ del proceso de infiltración, en cuanto a la veloci-

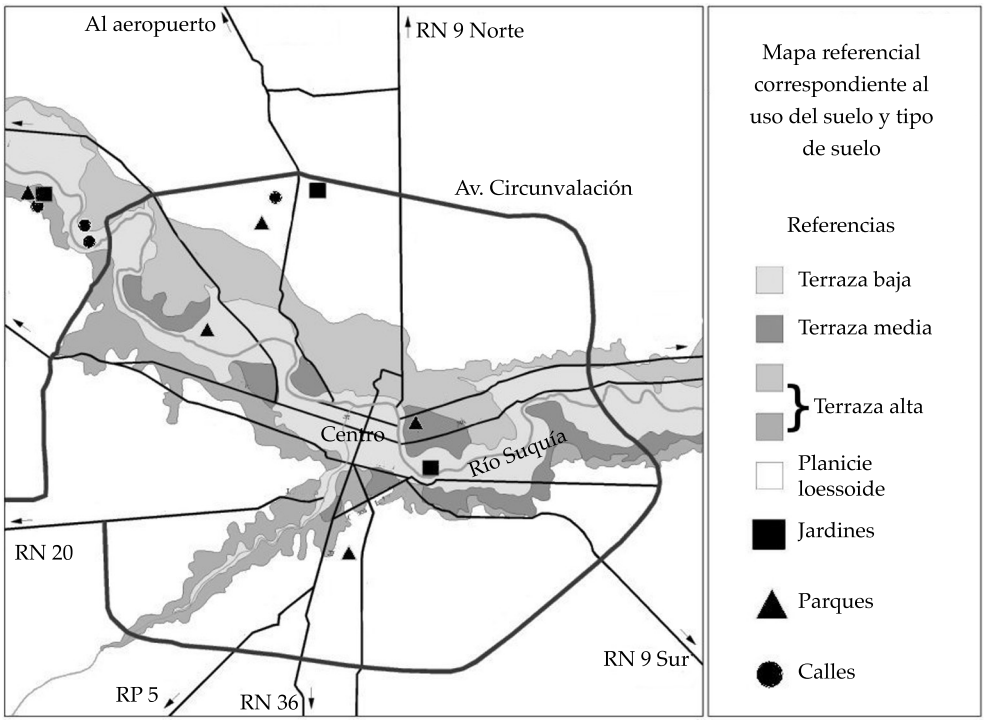


Figura 3. Ubicación de sitios de ensayo.

ISSN 0187-8336

Cuadro 1. Sitios de ensayo.

Tipo de suelo (ambiente geomorfológico)	Uso del suelo		
	Espacios verdes (bajo tránsito)	Espacios verdes (medio tránsito)	Calles no pavimentadas (alto tránsito)
Terraza alta	ITS Villada	ITS Villada	ITS Villada
Terraza media	------	Parque General Paz	Justo Liebig 5940-Bº Villa Belgrano
Terraza baja	Torres de Bº Junior	Parque de las Naciones	Carlos Gauss 4619-Bº Villa Belgrano
Planicie loessoide	L. Suárez de Figueroa-Bº M. de Sobremonte	Parque UTN Laguna de detención	Hugo Miatello 4600-Bº Poeta Lugones

dad con que se alcanzó la condición de régimen. El número y la frecuencia de las observaciones también fue dependiente de las condiciones locales encontradas, observándose una menor frecuencia de medición en el simulador (y, por tanto, una mayor frecuencia en el infiltrómetro) en los suelos de mayor capacidad de infiltración. Para facilitar la tarea de medición, se seleccionó en cada caso el volumen de medición, el cual varió desde 50 hasta 500 cm^3.

Determinación del contenido de humedad en laboratorio

Antes del inicio de cada ensayo se extrajeron muestras de suelo para determinar el contenido de humedad antecedente. El contenido de humedad fue determinado gravimétricamente, a través de la extracción de muestras de suelo a 10 cm de profundidad, secándolas en estufa a 110 ºC y pesando la muestra seca. La humedad gravimétrica ω se determina a través de la expresión (2):

$$\omega = \frac{m_a}{m_s} \qquad (2)$$

donde m_a es la masa de agua en la muestra de suelo, que resulta de la diferencia entre la masa de la muestra húmeda menos la masa de la muestra seca; m_s es la masa de la muestra seca. Para relacionar la humedad gravimétrica ω (de uso principal en geotecnia) con la humedad volumétrica θ (más frecuentemente usada en hidrología subterránea) se utilizó la expresión (3) (Tucci, 1993):

$$\theta = \omega \frac{d_a}{d_s} \qquad (3)$$

En esta expresión, d_a es la densidad del agua (asumida 1 g/cm^3) y d_s es la densidad (peso unitario) del suelo. Este valor se estimó a partir de las observaciones in situ realizadas en tareas anteriores en cada uno de los ambientes geomorfológicos descriptos (Weber *et al*., 2005).

Digitalización y proceso de datos

Los datos obtenidos en la campaña descrita fueron digitalizados y procesados mediante el uso de planillas de cálculo, y después exportados en formato de texto plano para su procesamiento a través de los códigos desarrollados en específico para este trabajo. Cabe destacar que el procesamiento implica también la suma de las series temporales de escurrimiento parcial en cada uno de los vasos recolectores, para obtener un único registro del escurrimiento superficial por ensayo. Como una medida del volumen de la información experimental generada, se puede citar que los 34 ensayos efectuados produjeron 6 259 pares de valores tiempo-infiltración (un promedio de 184 observaciones por ensayo).

El marco teórico

El modelo de Kostiakov

Kostiakov, en 1932 (Ravi & Williams, 1998), propuso las siguientes ecuaciones de carácter

• ISSN 2007-2422

empírico para estimar la tasa de infiltración y la infiltración acumulada:

$$F(t) = Kt^a \quad (4)$$

$$f(t) = Kat^{a-1} \quad (5)$$

donde K y a son los parámetros del modelo, que cumplen las restricciones $K > 0$ y $0 < a < 1$. Es de notar que la ecuación (5) tiende a 0 cuando t tiende a infinito, por lo que el modelo no suele dar buenos resultados para periodos extendidos. Además, para las restricciones mencionadas, la expresión (5) queda indeterminada para $t = 0$, esto es, no es posible definir la tasa inicial de infiltración.

Modificaciones al modelo de Kostiakov

En razón de lo mencionado, se propusieron diversas modificaciones al modelo de Kostiakov, en particular el denominado método de Kostiakov modificado (Al-Azawi, 1985), método de Lewis-Kostiakov (Ahuja, Kozak, Andales, & Ma, 2007) o método de Mecenzev (Ravi & Williams, 1998), que incluye como parámetro adicional la tasa base de infiltración f_b:

$$F(t) = f_b t + Kt^a \quad (6)$$

$$f(t) = f_b + Kat^{a-1} \quad (7)$$

En esta formulación, la tasa de infiltración tiende a la tasa base f_b cuando t tiende a infinito; de todos modos sigue siendo indefinido el valor de $f(0)$. Esto último podría ser significativo en la representación de procesos de muy corta duración y baja intensidad, que en general no tienen aplicación práctica en el diseño hidrológico urbano.

Otros modelos

Otros autores han presentado versiones mejoradas del modelo descrito. Clemens (1981, citado por Ahuja *et al*., 2007) describe una mejora del modelo de Lewis-Kostiakov mediante la introducción de una función escalón sin incrementar el número de parámetros del modelo, que ha mostrado una mejora sustancial en la predicción de la capacidad de infiltración a largo plazo.

Análisis y definición del modelo a utilizar

A pesar de las ventajas mencionadas de las versiones modificadas, es usual aún encontrar aplicaciones de las ecuaciones originales de Kostiakov (4), (5) debido principalmente a su simplicidad matemática y, a causa de ello, a que mediante la aplicación de logaritmos a ambos miembros de la expresión (4) se obtenga una relación lineal en un papel doble logarítmico:

$$\ln F(t) = \ln K + a \ln t \quad (8)$$

lo que permite encontrar gráficamente, o a través de una simple herramienta de regresión lineal, los parámetros del modelo, ya que *ln K* es la ordenada al origen y a la pendiente de la recta de regresión en papel log-log.

A diferencia de otros modelos, como el de Horton, por ejemplo, donde los parámetros tienen una correlación directa con alguna propiedad de la función $f(t)$, los parámetros K y a del modelo de Kostiakov impactan tanto en el valor de la tasa inicial de infiltración (entendida como el valor de f para un tiempo positivo suficientemente pequeño) como en la infiltración base (entendiendo como tal el valor mínimo que alcanza $f(t)$ en un intervalo de tiempo finito). En la figura 4 se muestran diversas curvas de la función $f(t)$ para distintos valores de los parámetros K y a. Puede observarse que, a igualdad de K, si a aumenta, la tasa de infiltración inicial disminuye y la tasa base de infiltración sube; y que, a igualdad de a, si K se incrementa, tanto la tasa inicial como la final de infiltración se acrecientan (K representa un factor de escala). Para el modelo de Lewis-Kostiakov, el comportamiento es similar, pero al sumarse la constante f_b se establece como tasa mínima absoluta ese propio valor.

ISSN 0187-8336

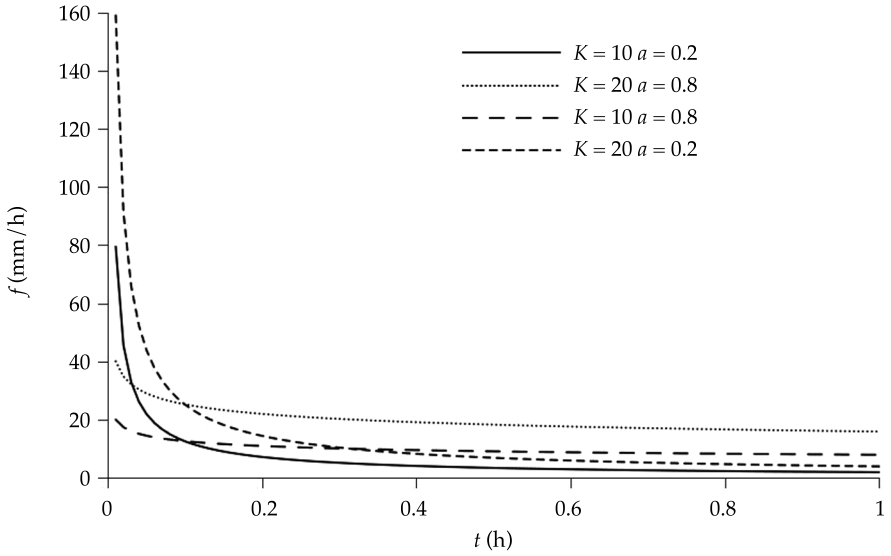


Figura 4. Tasa de infiltración según el modelo de Kostiakov para distintos valores de sus parámetros.

Resultados

La información experimental así generada fue expresada para las variables escurrimiento superficial acumulado, infiltración acumulada y tasa de infiltración. En las figuras 5 y 6 se presentan, a modo de ejemplo, la tasa de escurrimiento superficial y la infiltración acumulada obtenidas para un ensayo en uno de los sitios en particular (L. Suárez de Figueroa-Bº M. de Sobremonte) bajo una intensidad de lluvia de 66.6 mm/h.

La variable considerada para el ajuste fue la infiltración acumulada, dado que por su naturaleza presenta menor dispersión que su derivada, la tasa.

Ajuste de parámetros

Con base en la información recopilada en campaña mediante el uso del simulador de lluvia, se realizó el ajuste de los parámetros de los modelos descritos, buscando la minimización de la función objetivo (FO) representada por la suma de las desviaciones cuadráticas entre los n valores de infiltración acumulada observados (F_i) y calculados (F^c_i), para cada sitio de ensayo y cada condición inicial de humedad:

$$F.O. = \sum_{i=1}^{n}\left(F_i - F_i^c\right)^2 \qquad (9)$$

El proceso se automatizó utilizando un código *ad hoc* desarrollado en GNU Octave (Eaton, Bateman, & Hauberg, 2007), que para el caso del modelo de Kostiakov consistió en la aplicación de la regresión lineal al conjunto de datos linealizados por la expresión (8), mientras que para el modelo de Lewis-Kostiakov se aplicó el mismo procedimiento, pero para la variable reducida F^0 definida como:

$$F^0 = F(t) - f_b t \qquad (10)$$

de forma que el problema del ajuste se reduce al de optimación de la variable f_b, el que se realizó por fuerza bruta con un decimal de precisión.

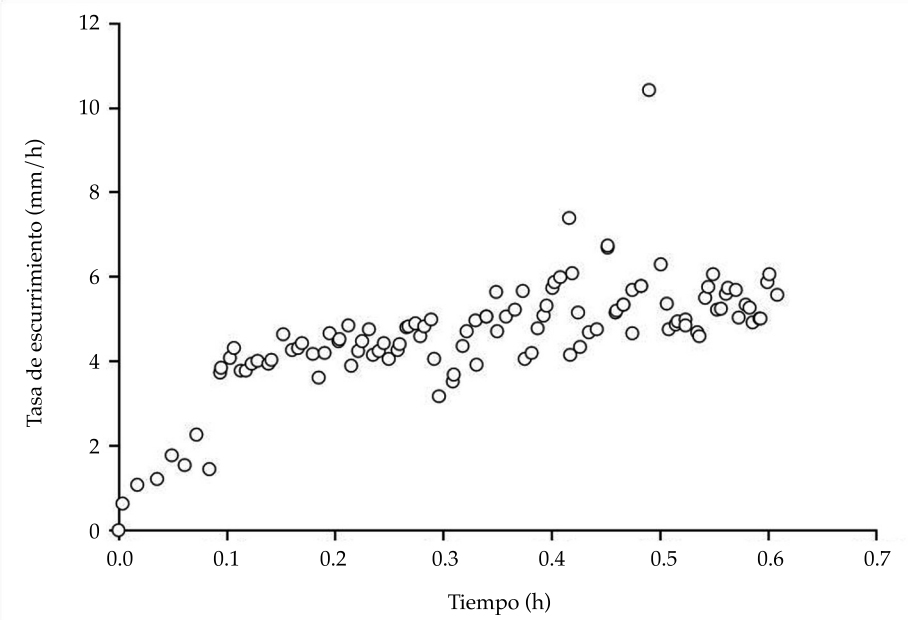


Figura 5. Tasa de escurrimiento superficial-Marqués de Sobremonte.

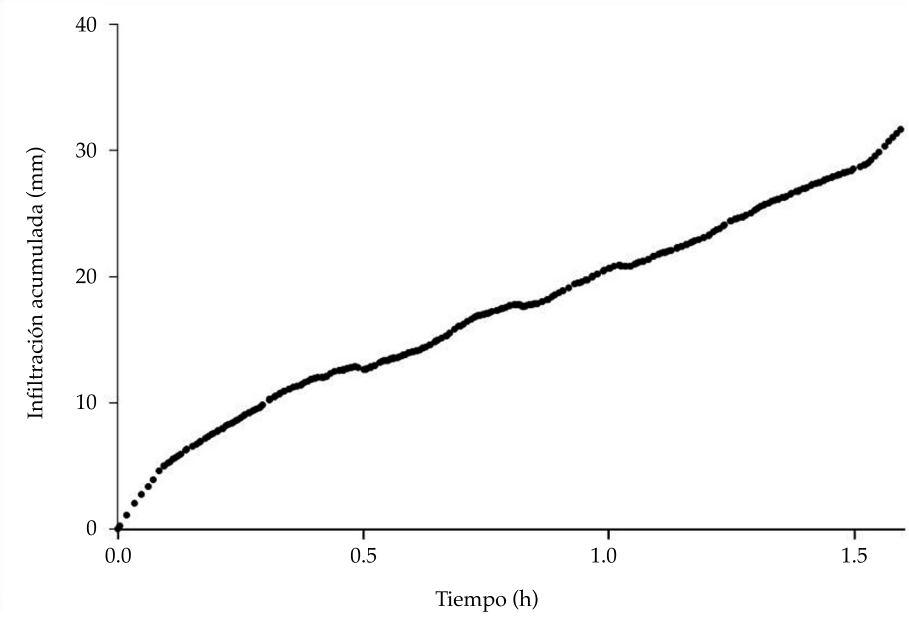


Figura 6. Infiltración acumulada-Marqués de Sobremonte.

El método de la fuerza bruta o de búsqueda directa (Chapra & Canale, 2006) consiste en discretizar el dominio de búsqueda con un paso fijo y evaluar la función en la malla así generada, detectando de esa forma el mínimo buscado. Es claro que la precisión y exactitud del método son una función directa del paso o intervalo seleccionado.

De este modo se obtuvieron 34 juegos de parámetros para cada modelo (ya que hubo dos mediciones que se consideraron no válidas), junto con el propio valor de la función objetivo, el cual es una medida de la bondad del ajuste realizado. En el cuadro 2 se presentan los valores ajustados de estos parámetros para cada sitio de ensayo y para cada medición para el modelo de Kostiakov, y en el cuadro 3 el equivalente para el modelo de Mecenzev o Lewis-Kostiakov.

Cuadro 2. Parámetros del modelo de Kostiakov.

Uso	Sitio	1a medición	2a medición	3a medición
Calles de tierra	Gauss 4619	$K = 23.01$	$K = 28.05$	$K = 15.70$
		$a = 0.55$	$a = 0.64$	$a = 0.87$
		$R^2 = 0.995$	$R^2 = 0.993$	$R^2 = 0.997$
	Miatello 4600	$K = 31.68$	$K = 26.50$	$K = 20.80$
		$a = 0.76$	$a = 0.76$	$a = 0.82$
		$R^2 = 0.997$	$R^2 = 0.997$	$R^2 = 0.996$
	Liebig 5940	$K = 40.06$	$K = 30.78$	$K = 25.82$
		$a = 0.87$	$a = 0.95$	$a = 0.73$
		$R^2 = 0.999$	$R^2 = 0.999$	$R^2 = 0.999$
	ITS Villada	$K = 20.06$	-----	$K = 31.05$
		$a = 0.51$		$a = 0.75$
		$R^2 = 0.994$		$R^2 = 0.996$
Parques	Parque Gral. Paz	$K = 50.60$	$K = 28.97$	$K = 45.76$
		$a = 0.87$	$a = 0.72$	$a = 0.85$
		$R^2 = 0.998$	$R^2 = 0.986$	$R^2 = 0.996$
	parque ITS Villada	$K = 31.13$	$K = 30.68$	$K = 31.77$
		$a = 0.79$	$a = 0.89$	$a = 0.76$
		$R^2 = 0.999$	$R^2 = 0.998$	$R^2 = 0.999$
	Laguna de retención	$K = 19.42$	$K = 29.16$	$K = 33.44$
		$a = 0.71$	$a = 0.74$	$a = 0.75$
		$R^2 = 0.997$	$R^2 = 0.995$	$R^2 = 0.995$
	Parque de las Naciones	$K = 48.02$	-----	$K = 33.55$
		$a = 0.86$		$a = 0.76$
		$R^2 = 1.000$		$R^2 = 0.992$
	UTN	$K = 33.10$	$K = 32.45$	$K = 37.27$
		$a = 0.79$	$a = 0.76$	$a = 0.84$
		$R^2 = 1.000$	$R^2 = 0.999$	$R^2 = 0.996$
Residencias	Casa Marqués de Sobremonte	$K = 43.66$	$K = 27.55$	$K = 35.67$
		$a = 0.82$	$a = 0.79$	$a = 0.72$
		$R^2 = 1.000$	$R^2 = 0.998$	$R^2 = 0.997$
	Jardín ITS Villada	$K = 26.89$	$K = 34.22$	$K = 40.45$
		$a = 0.81$	$a = 0.71$	$a = 0.76$
		$R^2 = 0.996$	$R^2 = 0.995$	$R^2 = 1.000$
	Torres de Junior	$K = 24.20$	$K = 16.65$	$K = 23.91$
		$a = 0.55$	$a = 0.63$	$a = 0.70$
		$R^2 = 0.998$	$R^2 = 0.979$	$R^2 = 0.992$

• ISSN 2007-2422

Cuadro 3. Parámetros del modelo de Mecenzev o Lewis-Kostiakov.

Uso	Sitio	1a medición	2a medición	3ª medición
Calles de tierra	Gauss 4619	$K = 12.80$	$K = 7.52$	$K = 1.23$
		$a = 0.34$	$a = 0.13$	$a = 0.36$
		$f_b = 10.2$	$f_b = 20.4$	$f_b = 14.7$
		$R^2 = 0.999$	$R^2 = 1.000$	$R^2 = 0.998$
	Miatello 4600	$K = 5.25$	$K = 4.86$	$K = 1.28$
		$a = 0.19$	$a = 0.26$	$a = 0.05$
		$f_b = 26.5$	$f_b = 21.7$	$f_b = 20.1$
		$R^2 = 1.000$	$R^2 = 1.000$	$R^2 = 1.000$
	Liebig 5940	$K = 5.64$	$K = 2.25$	$K = 11.20$
		$a = 0.42$	$a = 0.81$	$a = 0.50$
		$f_b = 34.4$	$f_b = 28.7$	$f_b = 14.6$
		$R^2 = 1.000$	$R^2 = 0.999$	$R^2 = 1.000$
	ITS Villada	$K = 11.41$	---	$K = 5.39$
		$a = 0.29$		$a = 0.19$
		$f_b = 8.6$		$f_b = 25.7$
		$R^2 = 0.999$		$R^2 = 1.000$
Parques	Parque Gral. Paz	$K = 3.22$	$K = 2.49$	$K = 2.00$
		$a = 0.05$	$a = -0.20$	$a = -0.09$
		$f_b = 47.6$	$f_b = 26.7$	$f_b = 44.2$
		$R^2 = 1.000$	$R^2 = 0.999$	$R^2 = 0.999$
	Parque ITS Villada	$K = 8.01$	$K = 0.47$	$K = 10.95$
		$a = 0.42$	$a = -0.39$	$a = 0.47$
		$f_b = 23.1$	$f_b = 30.5$	$f_b = 20.8$
		$R^2 = 1.000$	$R^2 = 1.000$	$R^2 = 0.999$
	Laguna de Retención	$K = 6.93$	$K = 5.92$	$K = 5.16$
		$a = 0.39$	$a = 0.24$	$a = 0.10$
		$f_b = 12.4$	$f_b = 23.4$	$f_b = 28.3$
		$R^2 = 0.998$	$R^2 = 1.000$	$R^2 = 1.000$
	Parque de las Naciones	$K = 14.81$	---	$K = 2.75$
		$a = 0.63$		$a = -0.10$
		$f_b = 33.2$		$f_b = 31.1$
		$R^2 = 1.000$		$R^2 = 1.000$
	UTN	$K = 18.46$	$K = 32.45$	$K = 2.31$
		$a = 0.66$	$a = 0.76$	$a = -0.18$
		$f_b = 14.6$	$f_b = 0.0$	$f_b = 34.8$
		$R^2 = 1.000$	$R^2 = 0.999$	$R^2 = 0.999$
Residencias	Casa Marqués de Sobremonte	$K = 27.91$	$K = 8.24$	$K = 9.66$
		$a = 0.74$	$a = 0.49$	$a = 0.27$
		$f_b = 15.7$	$f_b = 19.3$	$f_b = 25.9$
		$R^2 = 1.000$	$R^2 = 0.999$	$R^2 = 1.000$
	Jardín ITS Villada	$K = 26.89$	$K = 9.67$	$K = 40.45$
		$a = 0.81$	$a = 0.30$	$a = 0.76$
		$f_b = 0.0$	$f_b = 24.5$	$f_b = 0.0$
		$R^2 = 0.996$	$R^2 = 0.998$	$R^2 = 1.000$
	Torres de Junior	$K = 23.80$	$K = 2.53$	$K = 4.52$
		$a = 0.54$	$a = -0.07$	$a = 0.11$
		$f_b = 0.4$	$f_b = 14.3$	$f_b = 19.4$
		$R^2 = 0.998$	$R^2 = 0.998$	$R^2 = 0.999$

ISSN 0187-8336 •

Como puede verse, los valores de R^2 son altos, comprendidos entre 0.9301 y 0.9998 para el modelo de Kostiakov, y 0.9575 y 0.9999 para Lewis-Kostiakov. De hecho, y como era de esperar, se obtienen mejores ajustes con este último, lo que se ve reflejado en la figura 7, donde se presentan los valores de R^2 obtenidos con el modelo de Lewis-Kostiakov, en función de los R^2 obtenidos con Kostiakov; puede verse que el conjunto de puntos se ubica por encima de la recta identidad.

Es de notar que en algunas mediciones, el parámetro *a* del modelo de Lewis-Kostiakov resultó negativo; esto se explica porque la capacidad de infiltración creció ligeramente durante el ensayo, pudiéndose justificar por una ligera disminución en la intensidad de la lluvia generada o a particularidades en el sitio de ensayo.

En las figuras 8 y 9, a título de ejemplo, se presenta la infiltración acumulada, resultado de una medición en particular (primera medición calle Gauss), junto con el ajuste obtenido con los modelos de Kostiakov y Lewis-Kostiakov, respectivamente. En los cuadros 4 y 5 se presentan los valores medios (junto con su rango de variación) de los parámetros de los modelos de Kostiakov y Lewis-Kostiakov, respectivamente, en función del uso del suelo.

En todos los casos, la inclusión del término $f_b.t$ en la expresión de Lewis-Kostiakov de la infiltración acumulada (6) se tradujo en una reducción de los valores de los parámetros *K* y *a*, como puede observarse en las figuras 10 y 11.

Se analizó una posible relación de dependencia entre los parámetros de ambos modelos, graficando, para el modelo de Kostiakov, *K versus a*, y para el modelo de Lewis-Kostiakov, *K versus a*, *K versus* f_b, f_b *versus a;* observándose una posible relación en el caso de *K versus a* para Lewis-Kostiakov (figura 12). En estos gráficos también se clasificaron los puntos de acuerdo con el uso del suelo, no pudiéndose identificar un agrupamiento a partir del uso, aunque se aprecia que los valores del parámetro *K* del modelo de Lewis-Kostiakov para calles no pavimentadas presenta un rango más bajo y acotado que para los otros usos del suelo (figura 12).

En la figura 12 puede apreciarse un valor atípico (*outlier*) en $K = 2.2488$ y $a = 0.8125$. Extra-

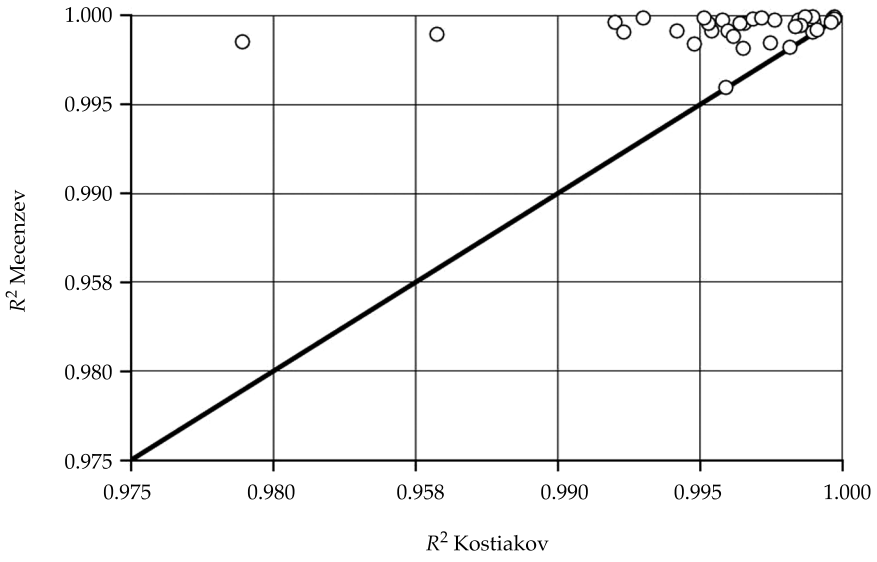


Figura 7. Coeficiente de determinación R^2 obtenido con el ajuste del modelo de Mecenzev en función del R^2 conseguido con el ajuste del modelo de Kostiakov.

• ISSN 2007-2422

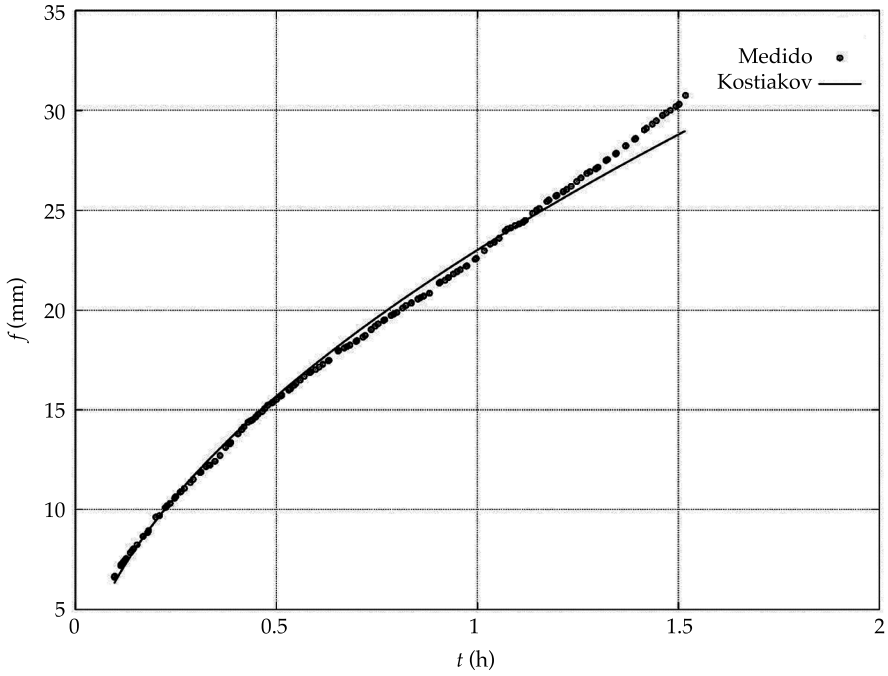


Figura 8. Infiltración acumulada, medida y obtenida por el modelo de Kostiakov-primera medición, calle Gauss.

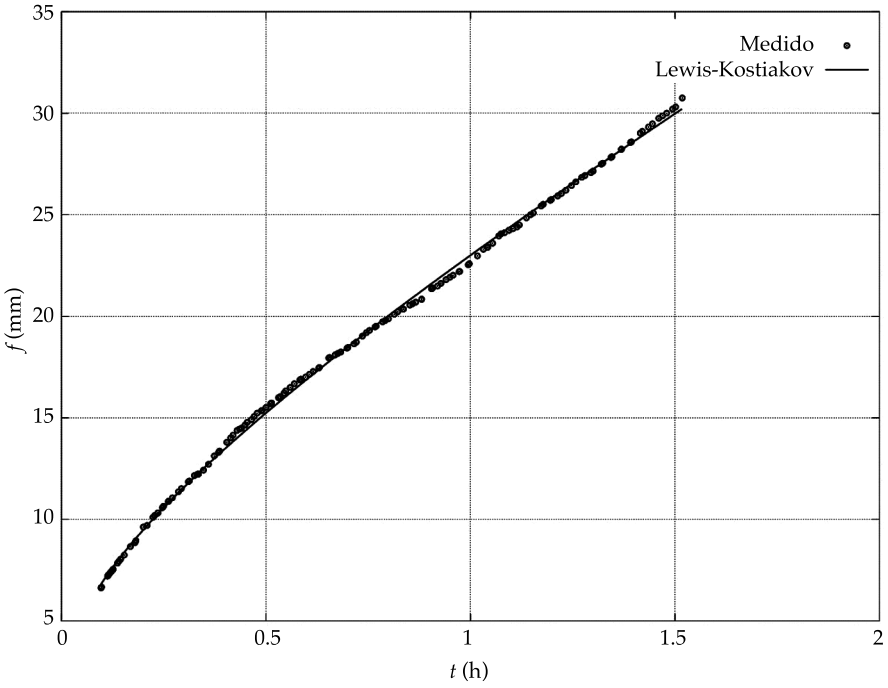


Figura 9. Infiltración acumulada, medida y obtenida por el modelo de Lewis-Kostiakov (Mecenzev)-primera medición, calle Gauss.

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 2, marzo-abril de 2016, pp. 115-132
ISSN 0187-8336 •

Cuadro 4. Parámetros medios del modelo de Kostiakov según el uso del suelo. Entre paréntesis, el rango de variación.

Uso	*K*	*a*
Calles	26.68 (15.70-40.06)	0.75 (0.51-0.95)
Parques	34.67 (19.42-50.60)	0.79 (0.71-0.89)
Viviendas	30.35 (16.65-43.66)	0.72 (0.55-0.82)

Cuadro 5. Parámetros medios del modelo de Lewis-Kostiakov según el uso del suelo. Entre paréntesis, el rango de variación.

Uso	*K*	*a*	f_b (mm/h)
Calles	6.26 (1.23-12.80)	0.32 (0.05-0.81)	20.51 (8.60-34.40)
Parques	8.28 (0.47-32.45)	0.20 (-0.39-0.76)	26.48 (0.00-47.60)
Viviendas	17.07 (2.53-40.45)	0.44 (-0.07-0.81)	13.28 (0.00-25.90)

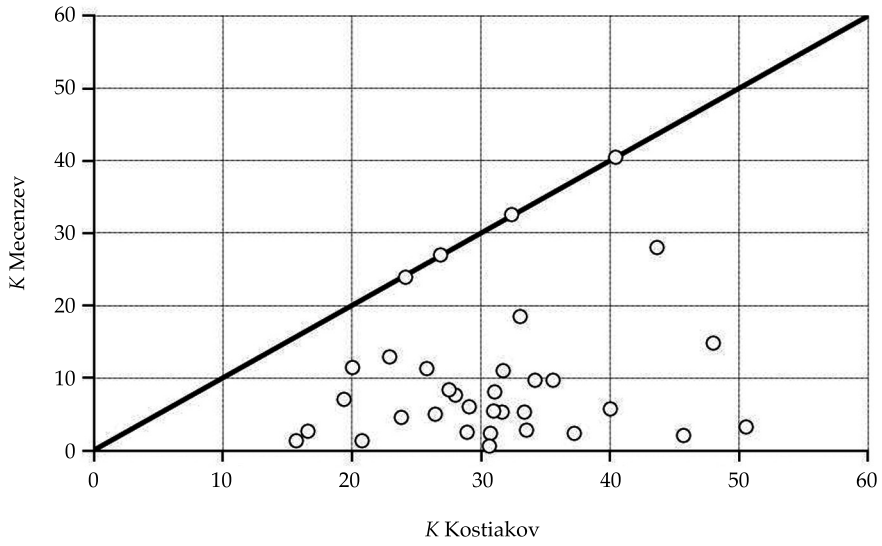


Figura 10. Relación entre los parámetros *K* de los modelos de Kostiakov y de Lewis-Kostiakov (Mecenzev). La línea continua corresponde a la función identidad.

yendo este valor de la serie fue posible ajustar una expresión de la forma:

$$a = \alpha \ln K - \beta \qquad (11)$$

con $\alpha = 0.261145$, $\beta = 0.203251$ y $R^2 = 0.76586$. A partir de este resultado, se planteó entonces la posibilidad de una modificación al modelo de Lewis-Kostiakov, denominado LK-2p (Lewis-Kostiakov a dos parámetros) de la forma:

$$F(t) = f_b t + K t^{\alpha K - \beta} \qquad (12)$$

donde f_b y K deberían ajustarse en cada medición, y α y β serían constantes en el nivel regional. Para explorar esta hipótesis, se desarrolló un código *ad hoc* en Octave que permitió ajustar de modo global (es decir, sobre las 34 mediciones) los valores óptimos de α y β, y localmente (esto es, para cada una de las 34 mediciones) los valores óptimos de f_b y K. La optimación global

• ISSN 2007-2422

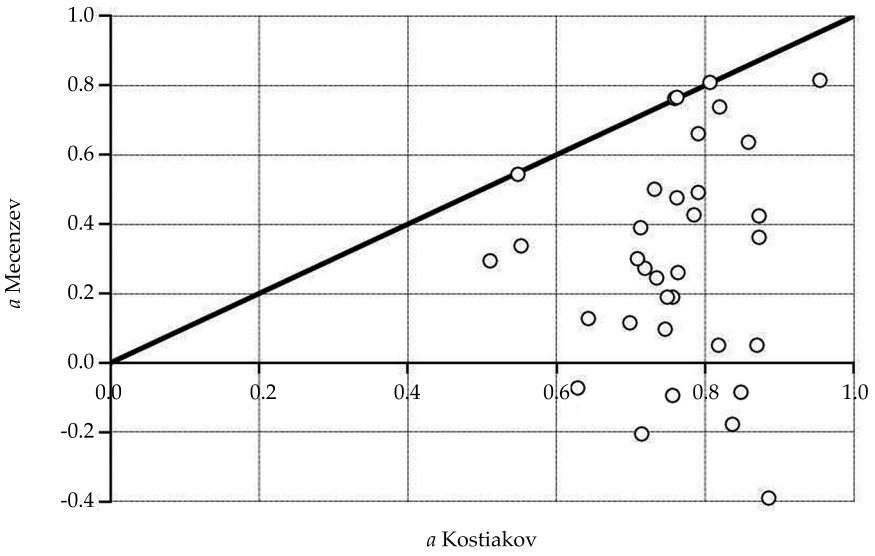


Figura 11. Relación entre los parámetros *a* de los modelos de Kostiakov y de Lewis-Kostiakov (Mecenzev). La línea continua corresponde a la función identidad.

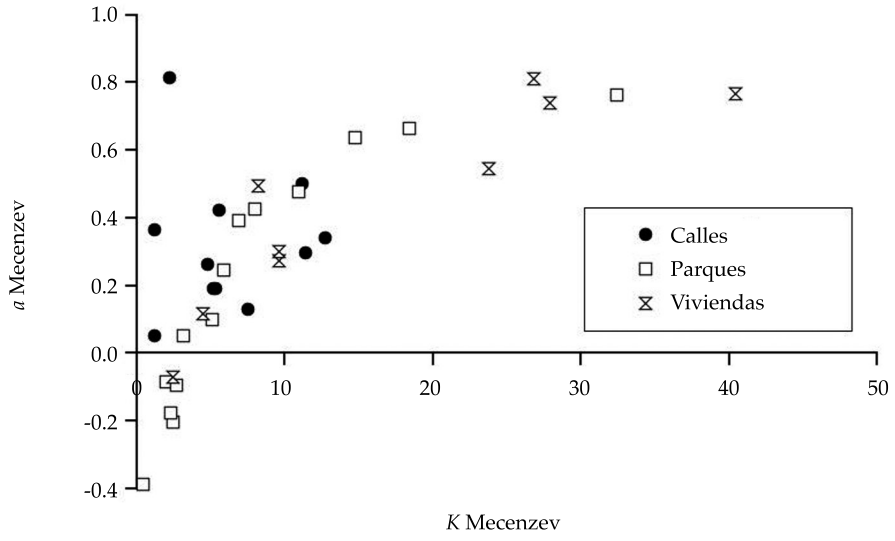


Figura 12. Relación entre los parámetros *a* y *K* del modelo de Lewis-Kostiakov (Mecenzev).

de α y β se realizó por medio de un autómata celular sencillo, minimizando la suma de los residuos cuadráticos (ecuación (9)). En este procedimiento, un apuntador recorre una malla regular bidimensional a partir de una solución aproximada central en las ocho direcciones posibles, identificando la posición del mínimo, reposicionando la malla, y repitiendo el proceso hasta que la posición del mínimo no varíe. La optimación local de los valores de f_b y K se

realizó aplicando el método de Nelder-Mead (Mathews & Fink, 2004). En ambos casos se hizo una optimación no restringida. Como valores óptimos se obtuvieron $\alpha = 0.2560$ y $\beta = 0.2040$, valores relativamente cercanos a los originales.

Los valores locales de los parámetros f_b y K pueden observarse en el cuadro 6. Si bien en algunos casos los parámetros así ajustados dan lugar a inconsistencias —valores negativos— en un valor de K y en tres valores de f_b, en la ge-

Cuadro 6. Parámetros del modelo LK-2p.

Uso	Sitio	1a medición	2a medición	3a medición
Calles de tierra	Gauss 4619	$K = 22.78$	$K = 14.42$	$K = -0.90$
		$f_b = 0.40$	$f_b = 13.73$	$f_b = 17.29$
		$R^2 = 0.997$	$R^2 = 0.998$	$R^2 = 0.981$
	Miatello 4600	$K = 5.81$	$K = 4.07$	$K = 1.00$
		$f_b = 25.98$	$f_b = 22.45$	$f_b = 20.00$
		$R^2 = 0.999$	$R^2 = 1.000$	$R^2 = 0.999$
	Liebig 5940	$K = 3.27$	$K = 2.06$	$K = 7.73$
		$f_b = 36.66$	$f_b = 29.30$	$f_b = 17.99$
		$R^2 = 0.999$	$R^2 = 0.999$	$R^2 = 1.000$
	ITS Villada	$K = 20.29$	-----	$K = 6.15$
		$f_b = -0.08$		$f_b = 25.00$
		$R^2 = 0.996$		$R^2 = 1.000$
Parques	Parque Gral. Paz	$K = 3.75$	$K = 4.55$	$K = 2.40$
		$f_b = 47.11$	$f_b = 24.80$	$f_b = 43.91$
		$R^2 = 1.000$	$R^2 = 0.998$	$R^2 = 0.999$
	Parque ITS Villada	$K = 5.57$	$K = 28.97$	$K = 7.79$
		$f_b = 25.44$	$f_b = 0.89$	$f_b = 23.90$
		$R^2 = 1.000$	$R^2 = 1.000$	$R^2 = 0.999$
	Laguna de Retención	$K = 4.84$	$K = 6.15$	$K = 7.54$
		$f_b = 14.42$	$f_b = 23.19$	$f_b = 26.01$
		$R^2 = 0.998$	$R^2 = 1.000$	$R^2 = 1.000$
	Parque de las Naciones	$K = 5.95$	-----	$K = 4.36$
		$f_b = 41.85$		$f_b = 29.59$
		$R^2 = 1.000$		$R^2 = 0.999$
	UTN	$K = 8.53$	$K = 18.99$	$K = 3.59$
		$f_b = 24.38$	$f_b = 13.12$	$f_b = 33.66$
		$R^2 = 0.999$	$R^2 = 0.999$	$R^2 = 0.999$
Residencias	Casa Marqués de Sobremonte	$K = 12.86$	$K = 5.18$	$K = 15.07$
		$f_b = 30.52$	$f_b = 22.18$	$f_b = 20.64$
		$R^2 = 1.000$	$R^2 = 0.999$	$R^2 = 1.000$
	Jardín ITS Villada	$K = 4.29$	$K = 13.64$	$K = 54.31$
		$f_b = 22.58$	$f_b = 20.61$	$f_b = -13.80$
		$R^2 = 0.993$	$R^2 = 0.998$	$R^2 = 1.000$
	Torres de Junior	$K = 35.04$	$K = 3.38$	$K = 5.57$
		$f_b = -10.76$	$f_b = 13.51$	$f_b = 18.40$
		$R^2 = 0.998$	$R^2 = 0.998$	$R^2 = 0.999$

• ISSN 2007-2422

neralidad los resultados son aceptables. Como es de esperar, los valores de R^2 son, en general, ligeramente menores para LK-2p frente a Lewis-Kostiakov (sólo en tres de los 34 ensayos R^2 es mayor para LK-2p), pero la reducción de tres a dos parámetros locales libres podría justificar no tener tanta exactitud.

Conclusiones y recomendaciones

A partir de la información recopilada in situ durante la campaña llevada a cabo en diversos sitios de la ciudad de Córdoba ha sido posible ajustar los parámetros de los modelos de infiltración de Kostiakov y Lewis-Kostiakov (Mecenzev), resultando en la mayoría de los casos este último como el de mejor desempeño. Al analizar una relación entre los parámetros a y K de este último, se observó una tendencia a una relación logarítmica, cuyas constantes de carácter global fueron ajustadas de manera simultánea con los parámetros locales f_b y K, dando lugar a un modelo de dos parámetros denominado LK-2p, que presenta algunas inconsistencias, producto de la no imposición de restricciones al ajuste; pero, en términos generales, se obtienen resultados aceptables, con valores de R^2 superiores a los del modelo de Kostiakov y ligeramente inferiores a los de Lewis-Kostiakov.

Si bien los modelos de Kostiakov y Lewis-Kostiakov no representan las formulaciones algebraicas más sofisticadas para la representación del proceso de infiltración, sí han mostrado un buen ajuste a los datos experimentales recolectados, incluso superior al de otros métodos de amplio uso, como el del CN-SCS (Weber, 2015b), y resulta atractiva la idea de aumentar la parsimonia a través de una relación empírica como la que da origen al denominado modelo LK-2p.

Resta investigar si la relación logarítmica (12) es propia de la información local obtenida en las mediciones realizadas en la ciudad de Córdoba o responde a un carácter más general.

En cualquier caso, se considera que el conjunto de parámetros así ajustados será de interés para los proyectistas vinculados con el manejo del escurrimiento pluvial urbano en la ciudad.

Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia y Tecnología (UTN) por el apoyo recibido a través del subsidio al Proyecto de Investigación consolidado "Caracterización experimental y modelación numérica de los procesos de infiltración, intercepción vegetal e impacto por incendios en cuencas de Córdoba", Código 25/E157. Al Laboratorio de Geotecnia de la Facultad Regional Córdoba de la Universidad Tecnológica Nacional. A la Dirección de Parques y Paseos, municipalidad de la ciudad de Córdoba. A los becarios y colaboradores Eliana Baldazar, Matías Bupo, Edwin Rondan, Franco Cosiansi, Emiliano Cobelas, Oscar Gribosqui, Ana María Guerrero, Diego Apestegui, Jorge Apestegui, Darío Ferrero, Ignacio Paoli, Francisco Obregón, y al Instituto Técnico Salesiano Villada.

Referencias

Achutegui, A., Abreu, X., & Páez, M. L. (1996). Diseño y evaluación de un simulador de lluvias tipo gotero con efecto vibratorio. *Venesuelos*, *4*, 24-28.

Ahuja, L. R., Kozak, J. A., Andales, A. A., & Ma, L. (2007). Scaling Parameters of the Lewis-Kostiakov water Infiltration Equation across Soil Textural Classes and Extension to Rain Infiltration. *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*, *50*(5), 1525-1541.

Al-Azawi, S. A. (1985). Experimental Evaluation of Infiltration Models. *Journal of Hydrology (NZ)*, *24*(2), 77-88.

Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2006). *Métodos numéricos para ingenieros*. México, DF: McGraw-Hill Interamericana.

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill Interamericana S.A.

Custodio, E., & Llamas, M. R. (Eds.) (1976). *Hidrología subterránea*. Barcelona: Ediciones Omega.

Eaton, J. W., Bateman, D., & Hauberg, S. (2007). *GNU Octave: A High-Level Interactive Language for Numerical Computations*. Recovered from www.octave.org.

Horton, R. E. (1939). *Analysis of Runoff-Plot Experiments with Varying Infiltration Capacity* (pp. 693-711). Washington, DC: Transactions American Goephysical Union.

Marelli, H. J. (1989). *La erosión hídrica. Proyecto: alternativas mejoradas conservacionistas de producción agrícola ganadera en el sur de Córdoba*. Publicación técnica 1. Córdoba, Argentina: INTA, Estación Experimental Agropecuaria Marco Juárez.

Mathews, J. H., & Fink, K. D. (2004). *Numerical Methods using Matlab* (4th Ed.). Upper Saddle River, USA: Pearson Prentice Hall.

Paoli, H. I., & Rojas, J. A. (2006). *Estudio Hidráulico, Teórico y Experimental, sobre Formadores de Gotas*. Mendoza, Argentina: Jornada de Estudiantes Investigadores.

Pla-Sentis, I. (1981). Simuladores de lluvia para el estudio de relaciones suelo agua bajo agricultura de secano en los trópicos. *Rev. Fac. Agron*., *12*(1-2), 81-93.

Quintana-Salvat, F., & Barbeito, O. (1994). Base geológica-geomorfológica para la planificación territorial de la ciudad de Córdoba y su entorno-Ejido Municipal *Fotointerpretación*, 1(2), 209-256.

Ravi, V., & Williams, J. R. (1998). *Estimation of Infiltration Rate in the Vadose Zone: Compilation of Simple Mathematical Models. Volume I.* Technical Report No. EPA/600/R-97/128a. Ada, USA: United States Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory.

Rostagno, C. M., & Garayzar, D. (1995). Diseño de un simulador de lluvia para estudios de infiltración y erosión de suelos. *Ciencia del Suelo*, *13*, 41-43.

SCS (1972). *National Engineering Handbook. Section 4: Hydrology*. Washington, DC: U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service.

Tucci, C. E. M. (2001). Urban Drainage in Humid Tropics. Volume I. In C. Maksimovic. *Urban Drainage in Specific Climates*. IHP-V-Technical Documents in Hydrology, 40(1). Paris: UNESCO.

Tucci, C. E. M. (Ed.) (1993). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: Editora da Universidade, UFRGS.

USACE (1981). *HEC-1 Flood Hydrograph Package User's Manual*. Davis, USA: U.S. Army Corps of Engineers.

USACE (2001). *HEC-HMS Hydrologic Modeling System User's Manual*. Davis, USA: U.S. Army Corps of Engineers.

USEPA (1977). *SWMM: Stormwater Management Model*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.

Weber, J. F. (marzo, 2015a). Parámetros del modelo de infiltración de Philip para áreas permeables del ejido urbano de la ciudad de Córdoba, Argentina. *Aqua-LAC – Revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe*, *7*(1), 39-48.

Weber, J. F. (2015b). *Eficiencia relativa de modelos de infiltración: caso ciudad de Córdoba (Argentina)*. XXV Congreso Nacional del Agua – Conagua, del 15 al 19 de junio de 2015, Paraná, Entre Ríos, República Argentina.

Weber, J. F. (enero-marzo, 2014a). Parámetros del modelo de infiltración de Horton obtenidos mediante el uso de un simulador de lluvia – Córdoba, Argentina. *Revista Ambiente & Água*, *9*(1), 161-172.

Weber, J. F. (2014b). *Parámetros del modelo de pérdidas CN-SCS para áreas permeables de la ciudad de Córdoba, Argentina*. V Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento Integral del Agua, del 12 al 14 de noviembre de 2014, Córdoba, Argentina.

Weber, J. F., & Apestegui, L. (2013). Parámetros del modelo de infiltración de Green y Ampt en suelos de la ciudad de Córdoba, Argentina. *Cuadernos del Curiham*, *19*, 87-103.

Weber, J. F., Apestegui, L., & Baldazar, E. (2011). *Medición de la capacidad de infiltración in situ de suelos de la ciudad de Córdoba mediante un microsimulador de lluvia portátil*. XXIII Congreso Nacional del Agua-Conagua, Resistencia, República de Argentina.

Weber, J. F., Paoli, H., & Apestegui, L. (2009). *Diseño, construcción y puesta a punto de un microsimulador de lluvia portátil para estudios hidrológicos*. XXII Congreso Nacional del Agua, Trelew, República de Argentina.

Weber, J. F., Paoli, H. I., & Apestegui, L. (2010). Microsimulador de lluvia portátil para estudios hidrológicos. *Tecnología y Ciencia*, *9*(18), 47-53.

Weber, J. F., Urbano, J. M., Stuyck, E. E., Azelart, D., & Martínez, N. B. (2005). Caracterización de los parámetros del modelo de Infiltración de Horton en suelos de la ciudad de Córdoba. *Cuadernos del Curiham*, *11*(1), 29-38.

Dirección institucional de los autores

M.C. Juan Francisco Weber
Ing. Laureana Apestegui

Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Córdoba
Departamento de Ingeniería Civil
Laboratorio de Hidráulica
Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina
Ciudad Universitaria
X5016ZAA Córdoba, Argentina
Teléfono: +54 (351) 4684 215
jweber@civil.frc.utn.edu.ar
lapestegui@civil.frc.utn.edu.ar

Haga clic aquí para escribir al autor

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 2, marzo-abril de 2016, pp. 115-132
• ISSN 2007-2422

El abasto de agua por pipa en el valle de Texcoco, México

• Monserrat Iliana Gómez-Valdez* • Jacinta Palerm-Viqueira •
Colegio de Postgraduados, México
*Autor de correspondencia

Resumen

Gómez-Valdez, M. I., & Palerm-Viqueira, J. (marzo-abril, 2016). El abasto de agua por pipa en el valle de Texcoco, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *7*(2), 133-148.

El estudio de caso centrado en cinco municipios del valle de Texcoco: Chiautla, Chiconcuac, Papalotla, Tepetlaoxtoc y Texcoco aborda la caracterización de los usuarios de agua de pipa (carros tanque, carros aguateros, camión cisterna) y establece un estimado del número de usuarios. El abasto de agua por pipa es esencial para un sector de la población, sin embargo hay un gran desconocimiento sobre este tipo de abasto y las características de los usuarios. Como se verá, en efecto la cobertura de agua por medio de red en el Valle de Texcoco presenta importantes rezagos debido al incremento de diversos asentamientos, por ello es común que en muchas zonas del área, el suministro de agua se proporcione por pipas; pero no sólo es por ausencia de cobertura de red que se recurre al abasto de agua por pipa.

Palabras clave: pipas, abasto, agua, colonias, irregulares.

Abstract

Gómez-Valdez, M. I., & Palerm-Viqueira, J. (March-April, 2016). Water Supplied by Truck in the Valley of Texcoco, Mexico. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 7(2), 133-148.*

This study included five municipalities in the Valley of Texcoco —Chiautla, Chiconcuac, Papalotla, Tepetlaoxtoc and Texcoco— in which the users of water supplied by truck (water tank cars, delivery cars and cistern trucks) were characterized and the number of users was calculated. Water supplied by trucks is crucial to a portion of the population, nevertheless knowledge is greatly lacking about this type of supply and the characteristics of the users. As will be described, the coverage of water by the supply network in the Valley of Texcoco is significantly deficient due to the increase in settlements. It is therefore common for many zones in the area to receive water from trucks. Nevertheless, the supply network's lack of coverage is not the only reason why water is supplied by trucks.

***Keywords**: Water trucks, supply, water, neighborhoods, informal settlements.*

Recibido: 12/05/2015
Aceptado: 03/09/2015

Introducción

En 2000, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) estableció los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), con el fin de reducir la pobreza extrema para 2015. El objetivo número siete, "Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente", cuenta con la meta 7.C, relacionada con agua potable y saneamiento, que establece reducir a la mitad la proporción de personas sin acceso sostenible a fuentes de abastecimiento de agua potable mejoradas entre el año de referencia (1990) y 2015. Tener acceso a agua potable significa contar con una fuente de abastecimiento de agua a menos de un kilómetro de distancia del lugar de uso y la posibilidad de obtener de manera fiable al menos 20 litros diarios para cada miembro de la familia para fines domésticos y de higiene personal, así como para beber y cocinar (OMS, 2015); cabe resaltar que esta definición no incluye el abasto de agua potable por pipas (también llamados camión cisterna, carro tanque, aguatero).

México anunció a finales de 2008 que ya había alcanzado la meta 7.C, indicando: "Conforme a las definiciones de los ODM, al 2008 México tenía una cobertura de agua potable del 90% nacional" (Domínguez-Serrano, 2010). En otro texto de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) (Conagua, 2012), basado en los datos del Censo de Población y Vivienda de 2010, indica que 90.9% de la población tenía cobertura de agua potable (cuadro 1).

De acuerdo con la definición de INEGI, se considera a la población sin "acceso seguro y sustentable" de agua a un conjunto de situaciones caracterizadas en el censo como "no tiene acceso a red" y, en ese caso, hay posibilidad de señalar "fuente de agua: pipa" o "fuente de agua: arroyo, río, lago, pozo". El censo arroja que un 8.59% de la población total del país "no tiene acceso a red" y que 1.92% no tiene acceso a la red y tiene como fuente de agua a pipas; otro porcentaje, 1.47%, se reporta en el censo como "no especificado" (INEGI, 2010) (cuadro 2).

Estudio de caso: valle de Texcoco

El estudio se llevó a cabo en cinco municipios del Valle de Texcoco: Chiautla, Chiconcuac, Papalotla, Tepetlaoxtoc y Texcoco; para éstos, el INEGI (2010) reporta que un 7.55% de la población se abastece por pipas. Sin embargo, los datos basados en el estudio de caso que en este trabajo reportamos muestran que el problema

Cuadro 1. Composición de la cobertura nacional de agua potable, serie de años censales de 1990 a 2010 (porcentaje).

Fecha	Disponen de agua entubada dentro de la vivienda o fuera de la vivienda, pero dentro del terreno (%)	Agua obtenida por acarreo, de llave pública o de otra vivienda (%)	Total (%)
1990	75.4	3.0	78.4
1995	83.0	1.6	84.6
2000	83.3	4.5	87.8
2005	87.1	2.1	89.2
2010	87.6	3.3	90.9

Fuente: Conagua (2012).

Cuadro 2 . Consumidores de agua de pipa en el país.

Entidad	Población total	No disponen de agua entubada	
		De pipa	De un pozo, río, lago, arroyo u otra
Aguascalientes	1 177 687	5 511	6 074
Baja California	3 074 323	88 269	20 577
Baja California Sur	620 566	34 161	9 649
Campeche	813 983	10 029	68 993
Coahuila de Zaragoza	2 704 498	16 824	20 681
Colima	638 872	581	6 878
Chiapas	4 730 208	104 890	948 837
Chihuahua	3 291 665	32 247	129 930
Distrito Federal	8 588 972	136 366	16 257
Durango	1 600 143	3 954	87 325
Guanajuato	5 444 741	145 407	145 885
Guerrero	3 363 541	188 481	808 214
Hidalgo	2 639 465	45 360	194 263

• ISSN 2007-2422

Cuadro 1 (continuación). Composición de la cobertura nacional de agua potable, serie de años censales de 1990 a 2010 (porcentaje).

Entidad	Población total	No disponen de agua entubada	
		De pipa	De un pozo, río, lago, arroyo u otra
Jalisco	7 230 012	95 068	182 575
México	14 953 514	373 405	470 756
Michoacán de Ocampo	4 288 330	77 191	267 321
Morelos	1 743 741	71 998	71 341
Nayarit	1 070 295	5 151	74 715
Nuevo León	4 582 448	36 385	63 596
Oaxaca	3 771 663	143 104	746 018
Puebla	5 710 227	199 441	505 860
Querétaro	1 809 908	47 225	41 649
Quintana Roo	1 302 257	20 238	58 980
San Luis Potosí	2 556 679	47 254	313 760
Sinaloa	2 747 428	11 654	116 966
Sonora	2 615 993	56 605	23 653
Tabasco	2 208 377	7 365	399 800
Tamaulipas	3 157 698	33 390	57 230
Tlaxcala	1 163 055	6 875	10 211
Veracruz de Ignacio de la Llave	7 533 923	67 933	1 397 909
Yucatán	1 938 190	1 214	40 693
Zacatecas	1 475 182	12 957	66 937
Total nacional	**110 547 584**	**2 126 533**	**7 373 533**
Porcentaje	**100**	**1.92**	**6.67**

Fuente: INEGI (2010).

de la cobertura del servicio público del agua por red es mayor al indicado en el censo de INEGI (2010).

Los resultados obtenidos permiten la siguiente caracterización de consumidores regulares de agua distribuida en pipas en el área de estudio (cuadro 3):

a) Consumidores de asentamientos "irregulares" o colonias sin red de agua potable. Los pobladores autodenominan a los asentamientos como irregulares y están adheridos a organizaciones de la sociedad civil (OSC), principalmente Antorcha Campesina. Son 39 130 consumidores; esto es, 12.79% de la población total del área de estudio.

b) Consumidores de asentamientos "regulares" sin red de agua potable. Los pobladores autodenominan a los asentamientos como regulares y no están afiliados a OSC. En algunos casos se logró establecer que corresponden a nuevo crecimiento de localidades pre-existentes. Se excluyen los casos de comunidades que, aunque no cuentan con red, tienen acceso a otras fuentes de agua, como manantiales. Tal es el caso, por ejemplo, de San Jerónimo Amanalco. Son 5 977 consumidores, esto es, 1.95 % de la población total del área de estudio.

c) Falla permanente en la red. Son consumidores de localidades con red de agua potable donde existen sectores con problemas

ISSN 2007-2422

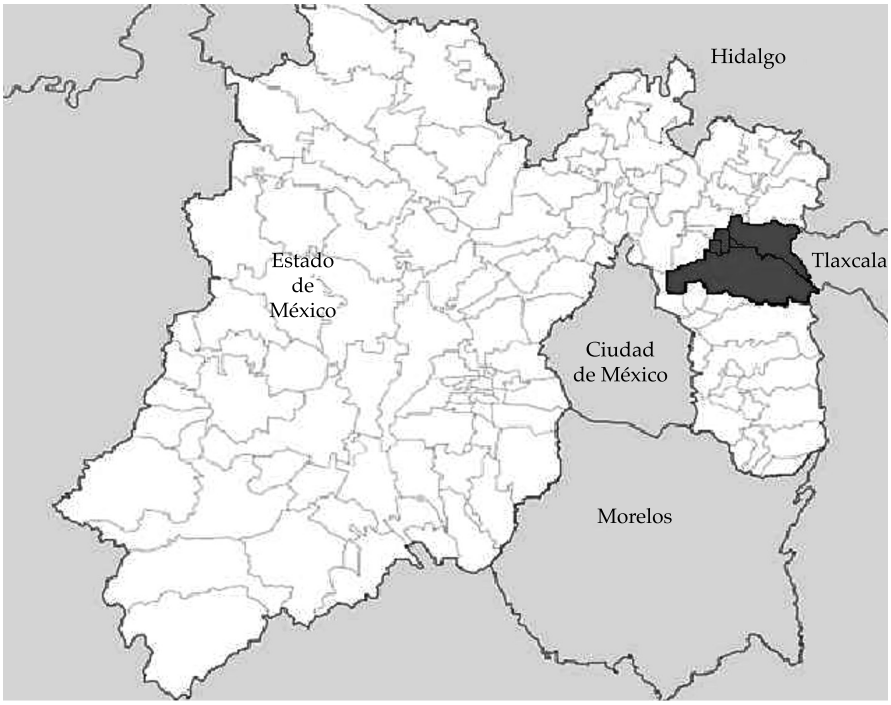


Figura 1. Área de estudio.

de baja presión, cola de la red y tandeo insuficiente. Se pueden caracterizar dos situaciones: aquellos consumidores que de manera sistemática y continuada recurren al abasto por pipas, y los casos en que de manera esporádica se recurre a abastecerse por pipas por fallas en el servicio. El recurso sistemático y continuado de abasto al agua por pipas se manifiesta en tres situaciones:

- Cuando en el sistema de red al que están conectados hay un horario insuficiente; es decir, que la cantidad de horas en que reciben el agua es insuficiente para sus necesidades; por ejemplo, el pozo se enciende de las 6 a 11 horas y de nuevo de las 18 a 21 horas.
- Cuando en el sistema de red al que están conectados hay un "tandeo" o días en que se tiene agua insuficiente; el tandeo se produce cuando el asentamiento se divide en secciones, y por medio de las diversas válvulas que conforman la red se abre o se cierra el servicio para las diferentes secciones. En los dos casos anteriores, los consumidores del servicio de agua por pipa no logran coincidir con los horarios del tandeo del sistema de agua por red, por lo que padecen constantemente de falta de agua, de tal manera que por la seguridad de contar con el agua se asisten de pipas.
- Aquellos casos en que en el sistema de red al que están conectados hay baja presión y/o están en la cola de la red de tal manera que les llega muy poca agua y no llenan sus almacenamientos. Son 1 213 consumidores, esto es, 0.40% de la población total del área de estudio.

d) Consumidores por calidad del agua. Son vecinos de localidades que se aprovisionan con pipas debido a la calidad del agua a decir de los pobladores; tal es el caso de los vecinos de la localidad de San Pablito, en el municipio de Chiconcuac, que se abastecen con agua de pipa porque el agua de pozo es "dura", o los vecinos de la localidad

• ISSN 2007-2422

La Magdalena Panoayac, en el municipio de Texcoco, que prefieren el agua de pipa porque la del pozo es "salitrosa". Son 2 107 consumidores, esto es, 0.69% de la población total del área de estudio.

e) Consumidores de localidades en que existe red de agua potable que no se conectan. Son consumidores que debido a los costos de conexión, cuotas y compromisos con la comunidad deciden abastecerse con pipas. La identificación de estos casos se obtuvo a partir de las entrevistas con los encargados de los Comités de Agua Potable (CAP) y con vecinos de La Purificación Tepetitla del municipio de Texcoco, San Andrés Chiautla en el municipio de Chiautla, y el Barrio San Pablo, en Tepetlaoxtoc. Este grupo de consumidores incluye a usuarios que consideran: (a) el costo de conexión muy alto, en un caso 30 000 pesos; (b) la familia extensa, en el mismo solar, no tendría por qué pagar conexión; (c) oneroso tener que participar en las faenas y otras cuotas, como escuela, de la comunidad. Cabe señalar que el primer caso incluye a vecinos con una toma de agua para su terreno, no obstante tener construcción de edificios de departamentos y que quieren pagar cuota anual de una sola toma. En estos casos se encontró a 3 182 consumidores, esto es, 1.04% de la población total del área de estudio.

Los resultados obtenidos en el estudio indican que la población sin acceso a red y que depende de pipas es mayor a la reportada por el INEGI: 45 107 habitantes, es decir, 14.75% de la población; pero además en los criterios del censo de INEGI de abasto de agua por pipa no se incluyen los casos de población que, no obstante tener conexión a la red, consume agua distribuida por pipa debido a diversas razones, como problemas de baja presión o tandeo insuficiente en la red, calidad de agua y vecinos que se rehúsan a conectarse a la red, y que significa una población de 6 502 habitantes, es decir 2.13%. De tal manera, que el total de habitantes que consumen regularmente agua distribuida por pipas en la zona de estudio es de 51 609 habitantes, o sea 16.87% de la población total de los municipios de estudio. Esta cifra no incluye los casos de fallas esporádicas en el servicio de abasto por red, así como el abasto regular por pipas al sector servicios: escuelas, negocios, centros de salud, etcétera, que también es importante.

Metodología

En seguida se describe la metodología que se siguió para localizar a los usuarios regulares del servicio de agua por pipa.

1. Entrevistas con administradores de sistemas de agua entubada

Para conocer las zonas que tenían problemas de abasto por red y que recurrían a servicio de agua por pipa en el área de estudio, se entrevistó

Cuadro 3 . Consumidores de agua de pipa en los municipios de estudio.

	Datos INEGI 2010		Datos reportados en el estudio					
	Población total de los cinco municipios de estudio	Población que se abastece por pipa	Sin red irregulares	Sin red regulares	Falla en la red permanente (tandeo insuficiente, cola red, baja presión)	Calidad de agua	Con acceso a red que no se conectan	Total calculado
Número	305 855	23 099	39 130	5 977	1 213	2 107	3 182	51 609
Porcentaje	100	7.55	12.79	1.95	0.40	0.69	1.04	16.87

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VII, núm. 2, marzo-abril de 2016, pp. 133-148
ISSN 2007-2422

a funcionarios de las presidencias municipales de los cinco municipios que conforman el área de estudio. Ello bajo el supuesto de que los municipios tienen el cometido de suministrar el servicio de agua entubada (Galindo-Escamilla & Palerm-Viqueira, 2007a y b). Los funcionarios de las presidencias municipales, salvo para la ciudad de Texcoco, la cabecera municipal del municipio de Papalotla y uno de los sistemas que abastecen la cabecera municipal del municipio de Chiautla y algunos fraccionamientos, indicaron la existencia de Comités de Agua Potable (CAP) como encargados de la administración de los sistemas de agua entubada. Los CAP se encuentran compuestos por un presidente, un secretario y un tesorero; son elegidos en asamblea comunitaria y el cargo, con una duración de tres años, es honorífico.

Debido a la ausencia de información municipal, se determinó entrevistar a los CAP; para ello se generó un listado de los CAP para cada uno de los municipios considerados. Hay un total de 80 CAP y tres ayuntamientos que administran sistemas en los cuatro municipios (cuadro 4). Se entrevistó a funcionarios de todos los ayuntamientos administradores de

Cuadro 4 . Localidades y tipos de administración del agua por municipio.

Municipio	Localidad	Administradores	Fuente que administra	Entrevistados
Chiautla	Santa Catarina	Ayuntamiento, Servicios Públicos	Pozo La Medianía	✓
	Colonia Guadalupe			
	Jalapango			
	Ampliación San Francisco			
	Fraccionamiento San Antonio		Pozo San Antonio	
	Arboledas			
	San Alberto			
	San Alberto II			
	San Luis			
	Real los Cedros			
	Pueblo San Lucas Huitzilhuacán	Comité de Agua Potable (CAP)	Pozos 1, 2 y 3	✓
	Barrio San Francisco			
	Pueblo San Juan			
	Pueblo San Sebastián			
	Pueblo Atenguillo			
	Barrio Santa Catarina			
	Pueblo Nonoalco	Comité de Agua Potable (CAP)	Pozo	
	Pueblo Chimalpa			
	Barrio Amajac			
	Atenguillo			
	Pueblo Huitznáhuac			
	Barrio Ixquitán			
	Barrio de San Bartolo			
	Pueblo Tepetitlán			
	Pueblo Ocopulco			
	Pueblo Tlaltecahuacán			
	Colonia La Concepción			
	Colonia Xalapango			
Chiconcuac	San Miguel			✓
	San Pablito Calmimilolco			✓
	Santa María			
	San Pedro			
	La Joyas			
	El Xolache y Xala			

• ISSN 2007-2422

Cuadro 4 (continuación). Localidades y tipos de administración del agua por municipio.

Municipio	Localidad	Administradores	Fuente que administra	Entrevistados
Papalotla	Barrio Belém	H. Ayuntamiento de Papalotla, a través de Dirección de Obras Públicas y Desarrollo Urbano	Pozo Belén	✓
	Barrio Chimalpa			
	Barrio Coxotla		Pozo Los Morales	
	Barrio Ixayoc			
	Barrio Mazatla			
Tepetaoxtoc	Tepetlaoxtoc de Hidalgo	Comité de Agua Potable (CAP)	Pozo	✓
	San Juan Totolapan			
	Sto. Tomás Apilpilhuasco			
	San Pedro Chiautzingo			
	San Bernardo Tlalmimilolpan			
	San Andrés de las Peras			
	La Loma			
	Los Reyes Nopala			✓
	La Concepción Jolalpan			✓
	La Candelaria Jolalpan			
	San Pablo Jolalpan			✓
	San Francisco Jolalpan			
	Colonia Tulteca Teopan			
	Barrio Tulteca Teopan			✓
Texcoco	Barrio San Pedro	H. Ayuntamiento de Texcoco, a través de la Dirección de Agua Potable y Alcantarillado	Pozo	✓
	El Xolache I			
	El Xolache II			
	Joyas de San Mateo			
	San Juanito			
	Santa Úrsula			
	Niños Héroes			
	Valle de Santa Cruz			
	El Centro			
	Las Salinas			
	Las Américas			
	San Lorenzo			
	El Carmen			
	San Mateo			
	San Martín			
	La Conchita			
	Joyas de Santa Ana			
	Zaragoza-San Pablo			
	Unidad Habitacional Las Vegas			
	Colonia Guadalupe Victoria			
	Los Sauces			
	Salitrería			
	Lomas de Cristo			
	Unidad Habitacional ISSSTE			
	Lomas de San Esteban			
	Colonia Villas de Tolimpa			
	San Sebastián			

ISSN 2007-2422

Cuadro 4 (continuación). Localidades y tipos de administración del agua por municipio.

Municipio	Localidad	Administradores	Fuente que administra	Entrevistados
Texcoco	San Felipe	Comité de Agua Potable (CAP)	Pozo	
	San Miguel Tocuila			
	Santa Cruz de Abajo			
	Vicente Riva Palacio			
	La Magdalena Panoaya			✓
	Boyeros			✓
	Santiaguito			
	Santa María Tulantongo			
	San Simón			✓
	Pentecostés			
	La Resurrección			✓
	San José Texopa			
	Los Reyes San Salvador			✓
	San Bernardino			
	Montecillos			✓
	El Cooperativo			✓
	Fraccionamiento El Tejocote			
	San Luis Huexotla			
	San Mateo Huexotla			
	San Nicolás Huexotla			
	Villa Santiago Cuautlalpan			
	San Miguel Coatlinchán			✓
	Colonia Bellavista			
	Colonia Sector Popular			✓
	Colonia Lázaro Cárdenas			
	Colonia Leyes de Reforma			✓
	Colonia El Trabajo			
	Unidad Habitacional Embotelladores			✓
	La Trinidad			
	San Diego			
	Santa Cruz de Arriba			
	Xocotlán			
	Santa Inés			✓
	Santa Cruz Mexicapa			✓
	San Dieguito Xochimanca			
	San Juan Tezontla			
	San Pablo Ixayoc			
	San Nicolás Tlaminca			
	San Joaquín Coapango			
	La Purificación Tepetitla			
	Santa María Nativitas			
	Tequexquinahuac		Pozo y manantial	
	San Miguel Tlaixpan			
	Santa Catarina del Monte		Manantial	
	Santa María Tecuanulco			
	San Jerónimo Amanalco			
	Colonia Guadalupe Amanalco			

• ISSN 2007-2422

sistemas y se determinó realizar un muestreo (no aleatorio) de los CAP. Se contactó a los CAP mediante visita a las localidades. En cada caso, a los miembros del CAP contactado se les explicó el tipo de estudio que se estaba realizando y se acordó una fecha para la entrevista. Se contó con una guía de entrevista centrada en preguntar si había viviendas **que recurriesen a abasto por pipa** y el motivo, así como su localización. En total se entrevistaron 25 administradores de sistemas: 22 CAP y tres municipales de un total de 83 administradores: 80 CAP y tres municipales.

A continuación se realizaron recorridos de las zonas indicadas por los CAP con viviendas con abasto por pipas y se entrevistó a los vecinos. Se indagó el número de casas afectadas y se geoposicionaron. Para cada caso se elaboró una ficha descriptiva con la información obtenida. Las causas de abasto regular por pipas fueron por baja presión o tandeo insuficiente, calidad del agua y casos de viviendas con acceso a red que deciden no conectarse.

Cabe señalar que actualmente se está presentando una discusión sobre la evaluación de la capacidad de administración eficaz de pequeños sistemas por municipios o por los CAP; en general, los estudios indican una mayor eficacia de los CAP (Ennis-McMillan, 2001; Galindo-Escamilla & Palerm-Viqueira, 2007a, 2007b, 2009, 2012; Guerrero *et al*., 2010; Lopez, Martínez-Saldaña, T., & Palerm-Viqueira, 2013; Salcido, Peter, & Martínez, 2010).

En las localidades, los usuarios mencionan que a través de CAP se invierten recursos de manera directa al mejoramiento del sistema de agua de la localidad; por otro lado, las solicitudes de conexión tienen una respuesta ágil; existe transparencia en el uso de los recursos, y realizan gestiones para la mejora del sistema de agua potable local ante el municipio. Por medio de asambleas, los usuarios son capaces de establecer sistemas de sanciones para todo aquel que no cumpla con las reglas y tienen el derecho de exigir rendición de cuentas al CAP; las sanciones para quienes forman parte del CAP, en caso de un mal manejo de los recursos, es el señalamiento de sus familiares y vecinos; esta posibilidad de exposición ante la comunidad genera un compromiso de los integrantes del CAP para llevar a cabo una gestión y administración más clara.

2. Ubicación de pozos que abastecen a pipas

Se ubicaron nueve pozos de abasto a pipas. Uno se localizó con la información brindada por la Subdirección Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Texcoco; cuatro por medio de los recorridos; y cuatro los indicaron los piperos. Cada pipero brindó información sobre el horario de funcionamiento del pozo y la aportación por la carga de la pipa.

Los pozos se visitaron para solicitar una entrevista con el encargado. No se obtuvo respuesta positiva para realizar las entrevistas. El acceso a los pozos es restringido: todos los pozos están bardeados o cercados, con un portón que se abre y cierra en cuanto entra o sale una pipa.

Los pozos se geoposicionaron y se creó una base en *Google Earth*. Después se realizó la búsqueda general por municipio en el Registro Público de Derechos de Agua (Repda), buscando las coincidencias de cada pozo con las coordenadas registradas en el sistema, a fin de obtener mayor información de cada pozo. Al introducir las coordenadas indicadas en la base de datos del REPDA de uno de los pozos identificados por el nombre del propietario, *Google Earth* lo ubicó en el estado de Puebla; por ello se utilizó el dato obtenido en campo para marcar su posición en la base de puntos. Se identificaron tres tipos de pozos: pozo municipal de agua potable de uso público urbano; pozo particular de agua potable de uso múltiple, y pozo particular de uso agrícola. Para cada pozo localizado se elaboró una ficha descriptiva.

3. Entrevistas con operadores de pipas (piperos)

Los piperos se contactaron en los pozos donde cargan agua y en los lugares de entrega del agua. Los piperos, en términos generales, fueron difíciles de entrevistar por estar de servicio

ISSN 2007-2422

y por una alta reticencia a hablar sobre cómo están organizados, quiénes son sus representantes en las organizaciones, la relación con los encargados de pozos, etcétera. En total se logró entrevistar a 12 piperos. Se les preguntó sobre los lugares de entrega de agua y las razones por las cuales se demandaba el servicio de agua por pipa, y el número de casas y /o familias a las que abastecían.

Los asentamientos mencionados por los piperos se anotaron en un listado y se pidió a los piperos que dieran alguna referencia para ubicarlas. Posteriormente se realizaron recorridos para confirmar sobre el terreno la ausencia de red y el abasto de agua por pipa. En los asentamientos irregulares, llamados localmente colonias, se entrevistó a los representantes de la colonia, así como a vecinos de la colonia.

Las pipas, en su mayoría, tienen grabado en el tanque el número telefónico de contacto; en algunos casos, en las puertas de las pipas tienen una calcomanía o distintivo de alguna OSC. Algunas de las que se pudieron observar son de la Confederación de Trabajadores de México (CTM), Confederación Revolucionaria de Obreros y Campesinos (CROC), Confederación Nacional Obrera Mexicana (CROM), Unión de Transportistas de Agua Potable del Valle de Texcoco (UTRAP) y el Sindicato Único de Piperos. Aquellas que son particulares no portan distintivo alguno, sólo tienen grabado algún número para realizar pedidos. Todas cuentan con la leyenda "transporte de agua potable" en alguna parte de la pipa.

4. Consulta bases de datos

Para la ubicación de asentamientos afiliados a OSC y no afiliados que no tienen red fue de importancia la información de los piperos, pues los funcionarios municipales y los CAP no cuentan con esta información. Los datos de las entrevistas con piperos se complementó mediante una búsqueda en el *Catálogo de grado de marginación* del Consejo Nacional de Población (Conapo) (Conapo, 2012) y en el *Catálogo del Programa de Desarrollo de Zonas Prioritarias* (PDZP) de la Secretaría de Desarrollo Social. Es curioso que la información de estos dos catálogos no incluyen todos los asentamientos localizados mediante entrevistas con piperos.

El procedimiento para la ubicación de localidades en los catálogos se describe a continuación:

En el caso de la base de datos sobre localidades con alto y muy alto grado de marginación (Conapo, 2012). Se ingresó a la página web de Conapo http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Indice_de_Marginacion_por_Localidad_2010 y se descargó la "base de datos completa por entidad" en Excel, versión 2007. Una vez descargada se abrió la base y se localizó la información correspondiente al Estado de México. Se buscaron los municipios de estudio: Chiautla, Chiconcuac, Papalotla, Tepetlaoxtoc y Texcoco.

Los datos de los municipios de estudio se copiaron y pegaron en una hoja nueva de Excel. Esta base contenía datos de población total, número total de viviendas particulares habitadas; porcentaje de población de 15 años o más analfabeta: porcentaje de población de 15 años o más sin primaria completa; porcentaje de viviendas particulares habitadas sin excusado; porcentaje de viviendas particulares habitadas sin energía eléctrica; porcentaje de viviendas particulares habitadas sin disponibilidad de agua entubada; promedio de ocupantes por cuarto en viviendas particulares habitadas; porcentaje de viviendas particulares habitadas con piso de tierra; porcentaje de viviendas particulares habitadas que no disponen de refrigerador; índice de marginación; grado de marginación; índice de marginación, escala de 0 a 100; lugar que ocupa en el contexto nacional; sitio que tiene en el ámbito estatal.

En la base creada se eliminaron las columnas de información que no eran de interés, quedando la columna de localidad, y porcentaje de viviendas particulares sin disponibilidad de agua y grado de marginación. Se eliminaron las localidades con un grado de marginación muy bajo, bajo y medio, que coincidían con

• ISSN 2007-2422

porcentaje de viviendas particulares habitadas sin disponibilidad de agua entubada de 0 a 15%. Se obtuvo un cuadro con 35 localidades.

En el caso de la base de datos *Catálogo de localidades del programa de desarrollo de zonas prioritarias*, se ingresó a la página web de la Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol) http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx y se descargó la información existente en la base de los municipios de estudio: Chiautla, Chiconcuac, Papalotla, Tepetlaoxtoc y Texcoco en Excel. Se revisó la información del indicador de carencia de viviendas, poniendo especial atención al indicador de viviendas sin agua entubada de cada localidad.

Los datos de los municipios de estudio se copiaron y pegaron en una hoja de Excel nueva; la base contenía datos de clave de entidad, nombre entidad, clave de municipio, nombre de municipio, tipo de cobertura, municipio de la Cruzada Nacional contra el Hambre (CNH), clave de localidad, nombre de la localidad, población total, viviendas particulares habitadas, no disponen de agua entubada, no disponen de drenaje, no disponen de energía eléctrica, con piso de tierra, viviendas particulares habitadas que no disponen de sanitario o excusado, grado de marginación de la localidad, principales resultados por localidad (Estatus Iter 2010), creación posterior a 2010, zona de atención prioritaria (ZAP), cobertura programa de desarrollo de zonas prioritarias (PDZP) y ámbito.

En la base creada se eliminaron las columnas de información que no eran de interés, quedando la columna de localidad, número de viviendas particulares sin disponibilidad de agua y grado de marginación. Se eliminaron las localidades con un grado de marginación muy bajo, bajo y medio. Se obtuvo un cuadro con 35 localidades (cuadro 5), que coincidieron con las localidades obtenidas por medio de Conapo.

5. Recorridos: confirmación sobre el terreno

Con la información de las entrevistas realizadas con piperos, representantes de colonias, CAP y direcciones municipales, se elaboró un listado que fue la base de los recorridos de campo para verificar localidades, barrios y colonias que se habían detectado a través de entrevistas, y de las bases datos que se abastecían por pipa; se realizaron visitas y entrevistas para confirmar el tipo de abasto. Cada colonia identificada con abasto de agua con pipas se geoposicionó y se elaboró una ficha para cada una de las 54 colonias ubicadas.

Después de los recorridos y las visitas a las colonias, barrios y pueblos, se encontró que en algunos casos ya contaban con el servicio de agua por red y se eliminaron aquellas localidades que se abastecen de agua por manantiales de la comunidad, como Tequexquinahuac, San Miguel Tlaixpan, Santa Catarina del Monte, Santa María Tecuanulco, San Jerónimo Amanalco y Colonia Guadalupe Amanalco, pertenecientes al municipio de Texcoco.

Para planear los recorridos, primero se elaboró un listado de localidades de las que se sabía la ubicación por conocimiento de la zona, después se anexaron las localidades mencionadas por los piperos y las indicaciones que dieron para llegar a ellas. Todas las localidades se agruparon por municipio y se realizó una ruta base para el recorrido, por ejemplo: municipio de Texcoco-Coatlinchán: colonia Las Tijeras-Praderas de Tecuac-Valle de Tlaloc-Las Torres-ex Hacienda Tepetitlán-Paraíso 300.

En las localidades visitadas se preguntaba por aquellas del listado pertenecientes al municipio de visita, y los vecinos, en caso de saber su ubicación, daban las indicaciones para llegar a ellas. De esta forma se incluían al listado de colonias por visitar o, si quedaban cerca del área, se visitaban.

El total de localidades que corresponden a asentamientos sin red de agua, según se verificó en campo, fue de 54.

6. Representantes y habitantes de colonias con abasto de agua de pipas

Otra fuente de información fueron las entrevistas realizadas a representantes de las llamadas colonias que se abastecen con agua

ISSN 2007-2422

Cuadro 5 . Localidades y tipos de administración del agua por municipio.

Municipio	Localidad	Sin red irregulares	Sin red regulares	Falla en la red permanente (tandeo insuficiente, cola red, baja presión)	Calidad de agua	Con red, que no se conectan	
Chiautla	Colonia La Concepción	1 634					
	Chiautla			215		903	
	Ejidos Chiautla	1 290					
Chiconcuac	Barrio de San Pablito Calmimilolco				1 720		
	Ejidos Chiconcuac	1 075					
Papalotla	Orillas de la red			761			
Tepetlaoxtoc	Colonia Progreso	1 634					
	Barrio de San Pablo					516	
	Barrio de La Concepción					258	
	Colonia Víctor Puebla	8 600					
	Colonia Guadalupe Victoria	1 290					
	Colonia Fray Servando	2 150					
	Colonia Lázaro Cárdenas	860					
	Colonia Elsa Córdova	5 375					
	Colonia Wenceslao Victoria Soto	4 300					
	Colonia Valle de Tláloc	3 655					
	Colonia Los Tepetates	989					
	Colonia Las Torres	430					
	Colonia Guadalupe	108					
	Colonia Ampliación Sector	258					
	Ejido Montecillos	430					
	Colonia Salitrería	344					
	Ejido Huexotla	602				430	
	Ejido Boyeros	430					
	La Purificación					1 075	
	Colonia El Gavilán	258					
	Colonia El Jardín	86					
	La Magdalena Panoayac				387		
	Santa Cruz Mexicapa		26				
	Unidad Habitacional Embotelladores			237			
	Colonia Humberto Vidal	2 150					
	Santa Cruz de la Constancia		43				

• ISSN 2007-2422

Cuadro 5 (continuación). Localidades y tipos de administración del agua por municipio.

Municipio	Localidad	Sin red irregulares	Sin red regulares	Falla en la red permanente (tandeo insuficiente, cola red, baja presión)	Calidad de agua	Con red, que no se conectan	
	Rancho Xalapango		112				
	Colonia La Presa		69				
	Colonia El Paraíso		99				
	Santa Irene		103				
	Rancho Santa Martha		2 430				
	Rancho Santa Rosa		95				
	Colonia Ex-hacienda Tepetitlán		138				
	Colonia El Barco		43				
	Ejido San Juan Tezontla		112				
	Colonia Pozo el Milagro		34				
	San Agustín		120				
	Colonia Los Sauces		133				
	Rancho La Castilla		138				
	Colonia Las Tijeras		503				
	La Nopalera		125				
	Praderas de Tecuac		241				
	Ejidos de Beltrán Cuautlalpan		520				
	Colonia Puente Quebrado		262				
	Santa María Hidalgo y Carrizo		271				
	Colonia Paraíso 300 (Profesores)	1 075					
	Colonia San Isidro	108					
	Ejido los Reyes San Salvador		361				
Total		**39 130**	**5 977**	**1 213**	**2 107**	**3 182**	**51 609**
Porcentaje respecto a la población total en el área de estudio		**12.79**	**1.95**	**0.40**	**0.69**	**1.04**	**16.87**

de pipa, quienes brindaron información sobre el número de lotes, casas, familias o población total de la colonia, así como el número de pipas que abastecían la colonia y los días de abasto; se les cuestionó también acerca de la razón por la cual no contaban con red de agua potable y si pertenecían a alguna organización social. Además, al realizar los recorridos de campo y entrevistarlos, brindaron información de colonias que eran abastecidas de agua con servicio de pipa y sobre las cuales no teníamos registro, como el caso de la Colonia Guadalupe, ubicada en predios del rancho Candelapa, y la Colonia San Isidro.

ISSN 2007-2422

Concentrado de información sobre localidades

En el cuadro 5 se presenta un concentrado de los usuarios de agua de pipa:

a) Consumidores de asentamientos "irregulares" o colonias sin red de agua potable. Asentamientos que se autodenominan irregulares y están adheridos a organizaciones de la sociedad civil, principalmente Antorcha Campesina.
b) Consumidores de asentamientos "regulares" sin red de agua potable. Asentamientos que se autodenominan regulares y no están afiliados a organizaciones de la sociedad civil. En algunos casos, se logró establecer que corresponden a nuevo crecimiento de localidades pre-existentes
c) Consumidores de localidades con red de agua potable donde existen sectores con problemas de baja presión, cola de la red y tandeo insuficiente.
d) Consumidores por calidad del agua.
e) Consumidores en localidades con red de agua, pero que no se conectan.

Análisis

Del total de consumidores ubicados en el estudio, 75.82% corresponde a asentamientos sin red que se autodenominan irregulares y están afiliados a OSC, pertenecientes en su mayoría a aquella denominada Antorcha Campesina. Esta OSC tiene gran presencia en la región. Los asentamientos corresponden a un patrón típico de zonas periurbanas del mundo: ante el alto crecimiento, y la ausencia o limitadas políticas públicas del gobierno para establecer vivienda barata, proliferan los asentamientos irregulares (favelas, ciudades perdidas, barrios de chabolas). De hecho, su informalidad o irregularidad significa que no están incluidos en la dotación de servicios públicos (Allen, Dávila, & Hofmann, 2005; Navarro-Garza, 2005; Saavedra, Bain, & Pardo, 2011).

En seguida, con 11.58% están los casos de consumidores de asentamientos sin red que se autodenominan regulares. Se distinguen de los anteriores por no estar afiliados a OSC y más bien parecen corresponder al crecimiento de localidades pre-existentes. En varios casos (cinco asentamientos de un total de 22) se logró establecer que el CAP de la comunidad de origen de los vecinos está en proceso de planificar la extensión de la red al nuevo asentamiento. No se logró establecer esta inclusión en todos los casos, pues el revuelo por la propuesta de una nueva ley de agua en ese año (2015) generó mucha inquietud entre los miembros de los comités directivos de los CAP.

Es notable que el porcentaje de usuarios que rehúsa conectarse a la red es mayor (6.17%) que aquel correspondiente a usuarios que recurren al abasto por pipas por fallas permanentes en la red; es decir, tandeo insuficiente, baja presión y cola de la red (2.35%). Este grupo que rehúsa conectarse a la red, de hecho lo que está haciendo es eludiendo el ordenamiento impuesto por la autoridad local administrativa del agua.

Es considerable el caso de habitantes que debido a su percepción de la calidad del agua abastecida recurran a pipas (4.08%); estos casos se presentan en el barrio de San Pablo y La Magdalena Panoayac.

En la zona existen 51 609 personas que se abastecen de agua de pipa, tomando como base una dotación media de 100 litros per cápita al día para abastecer a este grupo, se requerirían 1 883 729 m^3 anuales para satisfacer las necesidades de la población indicada.

Se debe señalar que en los ámbitos municipal o estatal no existe una planificación para apoyar el abasto de agua, innovando sobre las dos soluciones locales: redes a partir de pozos y pipas. No existen programas de recarga, plantas tratadoras de agua para su reúso, captación de agua del techo y otros posibles programas de apoyo al abasto y recuperación del acuífero —para el cual se reporta una sobreextracción de 43 millones de m^3 (Conagua, 2009)—. Además, en la región, la solución de redes de agua a partir de pozos no es posible en todos los casos

• ISSN 2007-2422

debido a la calidad del agua o a la inexistencia de acuífero, tal el caso de la parte alta de La Purificación y la parte alta de Coatlinchán, que obligan a rebombeo del agua desde partes más bajas, lo que significa un alto costo energético y la consecución de acuerdos con comunidades asentadas en esa área. La calidad del agua de pozos en algunas zonas también limita esta opción tecnológica.

La posibilidad de transferencia de concesiones del sector agrícola al urbano para el acuífero de Texcoco (más amplio que los municipios considerados en el estudio de caso) es limitada, pues las concesiones para el sector agrícola representan escasamente 9.3% del total de concesiones, con una cantidad de volumen concesionado equivalente al déficit que tiene el acuífero. La situación de sobreexplotación es aún más grave si se consideran los datos del censo de 1990 realizado por Gravamex, que señala una extracción de 465 367 701 metros cúbicos, mientras que el Repda en 2009, señala un volumen concesionado de 92 546 817(Conagua, 2009: 25 y 29).

Finalmente, no hay programas para mejorar y abaratar el abasto de agua por pipa como pilas comunitarias con redes de distribución a partir del almacenamiento que se llena con agua de pipa, que han resuelto la problemática del almacenamiento en viviendas (Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima & Programa de Agua y Saneamiento del Banco Mundial, 2006).

Conclusiones

La metodología para localizar población que depende de agua de pipa permitió establecer un estimado del número de usuarios, así como caracterizar a los usuarios. Es posible que la categoría de falla permanente en la red esté subestimada debido a que no se entrevistó a la totalidad de los CAP en el área de estudio. La metodología permitió detectar a un grupo de usuarios que prefiere no conectarse a la red. Los estimados muestran que hay una mayor población a la que se abastece por pipa que aquella reportada en el censo de población y vivienda (INEGI, 2010).

La problemática de acceso a agua potable por red no puede depender de la solución de más perforación de pozos debido a la sobreexplotación del acuífero, son necesarias otras políticas públicas regionales.

La restricción en el acceso a servicios públicos no es una limitante para la compra de terrenos y/o viviendas en áreas con uso de suelo distinto al urbano.

Ante el crecimiento desmedido de colonias irregulares son necesarias políticas públicas que coadyuven el acceso a viviendas o terrenos cercanos a los centros de población y que cuenten con servicios no sólo de agua, luz y drenaje sino de educación, comercio y centros de salud.

Los CAP, como administradores del agua, han respondido en la medida de lo posible al reto del crecimiento de la demanda. Es notable que comités honoríficos con muy limitado apoyo gubernamental estén logrando cubrir las necesidades de agua de 277 879 habitantes.

Referencias

Allen, A., Dávila, J., & y Hofmann, P. (2005). Agua y saneamiento en la interfaz periurbana: un vistazo a cinco estudios de caso. *Revista Ingeniería*, 22, 84-93.

Conagua (2009). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea, acuífero (1507) Texcoco, Estado de México*. México, DF: Comisión Nacional del Agua. Recuperado de http://www.conagua.gob.mx/Conagua07/Aguasubterranea/pdf/DR_1507.pdf.

Conagua (2012). *Atlas del agua en México 2012*. México, DF: Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/SGP-36-12.pdf.

Conapo (2012). *Índice de marginación por localidad 2010*. México, DF: Consejo Nacional de Población. Recuperado de http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/indices_margina/2010/documentoprincipal/Capitulo01.pdf.

Domínguez-Serrano, J. (2010). El acceso al agua y saneamiento: un problema de capacidad institucional local. Análisis en el estado de Veracruz. *Revista de Gestión y Política Pública*, *19*(2), 311-350.

Ennis-McMillan, M. (2001). *La Purificación Tepetitla: agua*

potable y cambio social en el somontano. México, DF: Universidad Iberoamericana.

Galindo-Escamilla, E., & Palerm-Viqueira, J. (2007a). *La centralización municipal del manejo del agua frente al manejo comunitario: efectos en las instituciones comunitarias*. III Congreso Asociación Mexicana de Estudios Rurales (AMER) A.C, Veracruz, Veracruz. Recuperado de http://www.academia.edu/1389380/La_centralizaci%C3%B3n_municipal_del_manejo_del_agua_potable_frente_al_manejo_comunitario_efectos_en_las_instituciones_comunitarias.

Galindo-Escamilla, E., & Palerm-Viqueira, J. (2007b). Pequeños sistemas de agua potable: entre la autogestión y el manejo municipal en el estado de Hidalgo, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, *4*(2), 127-145.

Galindo-Escamilla, E., & Palerm-Viqueira, J. (2009). *Las otras instituciones y el manejo eficiente del agua potable a pequeña escala: el Valle de Tlazintla- Pozuelos, un caso de autogestión* (p. 21). XXXIV Simposio de Historia y Antropología, Edición Internacional "Tierra y Agua: Protagonistas de la Historia," Hermosillo, Sonora. Recuperado de http://jacintapalerm.hostei.com/Emmanuel_Sonora.pdf.

Galindo-Escamilla, E., & Palerm-Viqueira, J. (2012). Toma de decisiones y situación financiera en pequeños sistemas de agua potable: dos casos de estudio en El Cardonal, Hidalgo, México. *Región y Sociedad*, *24*(54). Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-39252012000200009&script=sci_arttext.

Guerrero, A., Gerritsen, P., Martínez, L., Salcido, S., Meza, D., & Bustos, H. (2010). Gobernanza y participación social en la gestión del agua en la microcuenca El Cangrejo, en el municipio de Autlán de Navarro, Jalisco, México. *Economía, Sociedad y Territorio*, *10*(33). Recuperado de http://est.cmq.edu.mx/index.php/est/article/view/147/516.

INEGI (2010). *Censo Nacional de Población y Vivienda 2010*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Recuperado de http://www.inegi.org.mx/est/lista_cubos/consulta.aspx?p=pob&c=1.

Lopez, S., Martínez-Saldaña, T., & Palerm-Viqueira, J. (2013). Las comunidades en la administración de sistemas de agua potable: región de los volcanes, Estado de México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, *10*(1), 39-58.

Navarro-Garza, H. (2005). Transformaciones de los territorios periurbanos y sus agriculturas: el uso de los recursos de interés público en el Valle de México. En *Lo urbano-rural, ¿nuevas expresiones territoriales?* México: Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de http://www.crim.unam.mx/drupal/crimArchivos/Colec_Dig/2005/Hector_Avila_Sanchez/7_Transformaciones_territorios_periurbanos.pdf.

OMS (2015). *Agua potable salubre y saneamiento básico en pro de la salud*. Organización Mundial de la Salud. Recuperado de http://www.who.int/water_sanitation_health/mdg1/es/.

Saavedra, F., Bain, K., & Pardo, M. (2011). *Dinámicas territoriales en la ciudad de México y su periferia*. México: Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO). Recuperado de http://web.flacso.edu.mx/micrositios/documentos/images/pdf/avances/cuaderno_trabajo_perisud_saavedra.pdf.

Salcido, S, Peter, W., & Martínez, L. (julio-agosto, 2010). Gobernanza del agua a nivel local: estudio de caso en el municipio de Zapotitlán de Vadillo, Jalisco. *El Cotidiano. Revista de la Realidad Mexicana Actual*, *162*, 83-89.

Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima, & y Programa de Agua y Saneamiento del Banco Mundial (2006). *Agua para las zonas periurbanas de Lima Metropolitana, Lima, Perú*. Recuperado de http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/guialcalde/5responsables/d5/071-Agua_Lima/COVAAP-PAS.pdf.

Dirección institucional de las autoras

M.C. Monserrat Iliana Gomez Valdez

Colegio de Postgraduados Campus Montecillo
Carretera México-Texcoco km 36.5
56230 Montecillo, Texcoco, Estado de México, México
Teléfono: +52 (595) 9550 164, (045) (55) 5967 7573
iliana.gomez@colpos.mx
ilianagomezv@gmail.com

Dra. Jacinta Palerm Viqueira

Colegio de Postgraduados
Centro de Estudios del Desarrollo Rural del Campus Montecillo
Carretera México-Texcoco km 36.5
56230 Montecillo, Texcoco, Estado de México, México
Teléfono: +52 (55) 5804 5900, (595) 9520 200, extensión 1876
jpalerm@colpos.mx
jacinta.palerm@gmail.com

Haga clic aquí para escribir al autor

• ISSN 2007-2422

Gestión del riego enfocada a variabilidad climática en el cultivo de papa: aplicación al Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa, México

• Ernesto Sifuentes* • Jaime Macías •
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México
*Autor de correspondencia

• Waldo Ojeda •
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

• Víctor M. González •
Ayuntamiento de Ahome, Sinaloa, México

• Daniel A. Salinas • José G. Quintana •
Universidad Autónoma de Sinaloa, México

Resumen

Sifuentes, E., Macías, J., Ojeda, W., González, V. M., Salinas, D. A., & Quintana, J. G. (marzo-abril, 2016). Gestión del riego enfocada a variabilidad climática en el cultivo de papa: aplicación al Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa, México. Tecnología y Ciencias del Agua, 7(2), 149-168.

Se desarrolló una plataforma computacional basada en tecnología de información y comunicaciones (TIC´s) para programación integral y gestión de riego por Internet en el cultivo de papa, la cual ajusta las demandas hídricas del cultivo de papa a la variabilidad climática observada en los últimos años en el Valle del Fuerte, Sinaloa, México. El fundamento de la tecnología fue un modelo de programación integral del riego basado en grados-día crecimiento (GD), integrándose a un *software* (*Irrimodel*) operado a través de Internet. El sistema cuenta con las siguientes capacidades: a) elabora planes de riego bajo diferentes escenarios climáticos, disponibilidad de agua y manejo; b) pronostica el riego con alta precisión de acuerdo con el desarrollo del cultivo y acumulación de GD; y c) genera y envía solicitudes de riego al módulo prestador del servicio. La transferencia a productores se hizo en tres meses en más de 3 000 ha, donde se presentaron dos niveles de uso. En 56% (1 738 ha), su aplicación fue con nivel alto, mientras que el resto con nivel medio. La superficie con nivel alto se conformó de 396 ha bajo riego por gravedad y 1 334 ha bajo riego por aspersión. Tanto en parcelas con riego por gravedad como de aspersión se incrementó la eficiencia de aplicación (Ea) (18%), rendimiento (7 t) y productividad del agua (1.5 $kg \cdot m^{-3}$), siendo mayor en las de gravedad contra manejo tradicional. En este trabajo se presenta un análisis de esta tecnología a gran escala como alternativa para la adaptación de la programación del riego ante los efectos del cambio climático.

Palabras clave: riego de precisión, grados-día, cambio climático, zonas de riego.

Abstract

Sifuentes, E., Macías, J., Ojeda, W., González, V. M., Salinas, D. A., & Quintana, J. G. (March-April, 2016). Irrigation Management for Potato Crops Based on Climate Variability: Application in Irrigation District 075, Fuerte River, Sinaloa, Mexico. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 7(2), 149-168.*

A computer platform was developed for integrated irrigation scheduling and management of potato crops based on information and communications technology using the internet. This technology adjusted the water demands of the potato crop according to the climate variability observed over recent years in the Valle del Fuerte, Sinaloa, Mexico. The basis of the technology was an integrated irrigation scheduling model based on increasing degree-days, with the integration of Irrimodel software operated over the internet. The system has the following capabilities: a) generates irrigation plans based on different scenarios related to climate, water availability and water management; b) produces a highly accurate irrigation prognosis according to the development of the crop and the accumulation of degree-days, and c) generates and sends irrigation requests to the service providers. The technology was transferred to producers over three months and covered over 3 000 ha. Two levels of use were identified —a high application level by 56% of the area (1 738 ha) and a medium level by the remaining area. The area with a high application level was composed of 396 ha which used gravity irrigation and 1 334 ha which used sprinkler irrigation. In both areas, with gravity irrigation as well as sprinkler irrigation, there was an increase in application efficiency (18%), yield (7 t) and water productivity (1.5 kg·m-3). The increase was greater with gravity than with traditional management. This work presents an analysis of the use of this technology on a large scale, as an option to adapt irrigation scheduling to the effects of climate change.

***Keywords**: Precision irrigation, degree days, climate change, irrigation areas.*

Recibido: 28/07/2011
Aceptado: 01/10/2015

Introducción

El cultivo de papa es de los más sensibles al riego por su alto contenido de agua en relación con su peso (80%). La calidad y cantidad de rendimiento dependen de modo fundamental del manejo del riego. Es el cuarto cultivo más importante del norte de Sinaloa, México, estableciéndose cada año de 12 000 a 14 000 ha, de las cuales el 75% son de bajo riego por gravedad, 22% de bajo riego por aspersión y 3% de bajo goteo, con una producción promedio de 26 t/ha. Sin embargo, es uno de los cultivos más caros, oscilando en unos $80 000 los costos de producción por hectárea (Sagarpa, 2010) debido a la aplicación excesiva de insumos.

En los últimos años se ha observado alta inestabilidad climática en el norte del estado de Sinaloa debido en gran medida al cambio climático, que ha provocado alteraciones considerables en los ciclos fenológicos de los cultivos e incremento en la presencia de eventos extremos, como sequías, heladas e inundaciones. Ante tal situación, cada vez es menos preciso el manejo tradicional de los cultivos, principalmente en cuanto a riego y nutrición, haciéndose necesario tecnologías que permitan adaptar el manejo de los cultivos a los nuevos escenarios climáticos (Ojeda, Martínez & Hernández, 2008). Con el desarrollo de las comunicaciones (Internet) y la informática, en la actualidad es posible generar aplicaciones agrícolas prácticas para los productores a través de modelos agroclimáticos para riego, plagas, enfermedades y otros. A través de Internet es posible tener acceso a datos climáticos en tiempo real de cualquier parte del mundo, desarrollar sistemas computacionales operados vía Internet e interactuar con varios tipos de usuarios en forma simultánea (Ojeda, Sifuentes, & Unland, 2006).

Considerando estos elementos, durante el ciclo agrícola otoño-invierno 2008-2009, el Campo Experimental Valle del Fuerte (Cevaf) del INIFAP, a través del Programa de Investigación Uso y Manejo del Agua, desarrolló una plataforma computacional compuesta de tecnología de comunicaciones y el *software* denominado *Irrimodel* (Sifuentes, Quintana, Macías, & González, 2013) para la programación integral y gestión del riego en tiempo real operado a través de Internet, generándose las condiciones para usar esta tecnología en forma masiva a partir del ciclo 2009-2010. Dicho sistema cuenta, entre otras, con las siguientes capacidades: 1) elabora planes de riego bajo diferentes escenarios climáticos, de disponibilidad de agua y manejo; 2) pronostica el riego con alto nivel de precisión de acuerdo con el desarrollo del cultivo determinado por la acumulación de grados día crecimiento (GDA), y 3) genera y envía solicitudes de riego al módulo que le presta el servicio hidráulico.

La ventaja de esta herramienta con respecto al método tradicional es que el productor, de una manera sencilla, aplica modelos de programación integral y gestión del riego en tiempo real a través de Internet, que le permite en forma anticipada programar sus riegos desde cualquier parte sin importar dónde se encuentre. Otra ventaja es que la eficiencia de los riegos y fertilizantes se incrementa, pues es posible mantener niveles óptimos de humedad y existe la posibilidad de reducir la cantidad de fertilizante nitrogenado. Estas condiciones también reducen el riesgo de enfermedades como rizoctonia (*Rhizoctonia solani)*, roña de la papa (*Streptomyces scabies* Thaxt.) y tizón tardío (*Phytophthora infestans*), lo cual ayuda a incrementar de manera significativa la calidad de la producción (Avery, 1983).

Se presentan los resultados en el uso de esta tecnología en el cultivo de papa en el Valle del Fuerte, ubicado al norte del estado de Sinaloa, México, durante el ciclo agrícola otoño-invierno 2009-2010. Tal propuesta representa el reto de aplicar por primera vez estos modelos a través de Internet. Ante la amenaza latente de eventos extremos, como sequías y heladas, este tipo de herramientas son vitales para afrontar y reducir sus efectos. Hoy día, dicha tecnología se está adaptando no sólo en el cultivo de papa sino para otros cultivos y otras regiones del estado.

• ISSN 2007-2422

Antecedentes teóricos

Importancia del riego de precisión en el cultivo de papa

La calidad y cantidad de tubérculos están relacionadas con una correcta calendarización del riego; por lo general, se contrarresta la deficiente calendarización incrementando la lámina y frecuencia del riego, o las aplicaciones de agroquímicos, para no tener mermas significativas en los rendimientos convencionales. La anterior práctica empieza a ser cuestionada ante la incertidumbre en la disponibilidad y cantidad del agua, variabilidad climática o por los problemas de contaminación atribuida a la agricultura intensiva.

El agua es el mayor componente de una planta de papa, alcanzando hasta 95% en los tejidos verdes y 85% en los tubérculos. Una planta de papa bajo condiciones óptimas de crecimiento y humedad puede reemplazar hasta cuatro veces al día su contenido de humedad por medio de la transpiración. La papa es más sensible al déficit hídrico del suelo que el trigo, soya o frijol, siendo sus etapas fenológicas más sensibles la formación de estolones y tubérculos.

La FAO (1986) afirma que si se estresa la papa durante la etapa de formación de tubérculos en un 50% de los requerimientos evapotranspirativos potenciales, se tendría una reducción de 35% en el rendimiento; durante la maduración se tendría una reducción de sólo 10%, y en la fase vegetativa, un 22%. Cambios drásticos en la humedad del suelo debido a riegos tardíos y pesados puede resultar en el agrietamiento o formación de corazones negros (necrosis interna) en los tubérculos, además de promover la presencia de otras enfermedades, como *Fusarium*, moho blanco y *Rhizoctonia* (UCLA, 2006).

Dudek, Gerald y Marshall (1981) llevaron a cabo un análisis y concluyeron que la programación del riego era rentable y benéfica si los productores pueden aplicar el riego con suficiente precisión. Parker, Cohen-Vogel, Osgood y Zilberman (2000) determinaron que el programa "Sistema de Información para el manejo del Riego de California" (CIMIS), operado por el Departamento de Agua y Recursos, a un costo de 850 000 dólares al año, ahorra agua y tiene otros beneficios que superan con creces el costo de operación. Así, la programación del riego ha sido conocido por ser beneficiosa (Marek *et al.*, 2010).

Efecto de la temperatura en la fenología del cultivo

La edad fisiológica de un tubérculo es producto de la edad cronológica y de los antecedentes ambientales de éste. Para medir la edad fisiológica se utiliza a menudo la acumulación de grados-día (GD) relacionada con la aparición de cada fase de desarrollo, que difieren para cada variedad (Jefferies & Lawson, 1991). Es decir, los estados de desarrollo casi siempre se presentan cuando se acumula el mismo valor de GD, con independencia de la fecha de siembra y del año; mientras que los días calendario muestran una amplia variación (cuadro 1). La estimación diaria de éstos requiere del conocimiento de la temperatura media ambiental diaria (T_a) de acuerdo con las siguientes ecuaciones (Ojeda *et al.*, 2006):

$$GD = T_a - T_{c\text{-mín}}, \text{ si } T_a < T_{c\text{-máx}} \quad (1)$$

$$GD = T_{c\text{-máx}}\, T_{c\text{-mín}}, \text{ si } T_a \geq T_{c\text{-máx}} \quad (2)$$

$$GD = 0, \text{ si } T_a \leq T_{c\text{-mín}} \quad (3)$$

Donde $T_{c\text{-mín}}$ y $T_{c\text{-máx}}$ son las temperaturas críticas mínima y máxima del cultivo, que en el caso de la papa son 2 y 29 °C, respectivamente.

La diferencia de duración del ciclo es de casi un mes entre las siembras de octubre y las de diciembre en el norte de Sinaloa, lo cual provoca alteración en la programación de las prácticas de manejo del cultivo. Además del efecto de la fecha de siembra existen alteraciones provocadas por la variabilidad y el cambio climático.

ISSN 2007-2422

Cuadro 1. Días para alcanzar varios valores de grados día acumulados (GDA) en papa, variedad alpha, para diferentes fechas de siembra, en el Valle del Fuerte Sinaloa (Sifuentes, Macías, Apodaca, & Cortez, 2009).

Fecha de siembra									
GDA	**01 oct.**	**10 oct.**	**20 oct.**	**30 oct.**	**10 nov.**	**20 nov.**	**30 nov.**	**10 dic.**	**20 dic.**
Días									
800	33	35	38	42	47	50	53	54	54
900	37	40	43	48	53	57	60	61	60
950	40	42	46	51	57	60	63	64	63
1 000	42	45	49	55	60	64	66	67	66
1 100	47	50	56	62	66	70	73	73	72
1 150	49	53	59	65	70	74	76	76	75
1 500	69	76	83	89	93	96	97	97	96
1 600	76	83	90	95	100	102	103	103	101
1 700	82	90	97	102	106	108	109	109	107
1 750	86	93	100	105	109	110	112	111	109
1 800	90	96	103	108	102	113	115	114	112
1 850	93	100	106	111	115	117	117	116	114
1 900	96	103	110	114	118	120	120	119	117
2 000	103	110	116	121	124	126	126	124	122

Proyecciones de cambio climático para México y el estado de Sinaloa

El cambio climático es un fenómeno recurrente en la historia del planeta, pero a un ritmo más lento del observado en la actualidad. El IPCC (2007) lo define como una variación estadísticamente significativa del estado global del clima o de su variabilidad durante un largo periodo de tiempo.

El panel intergubernamental de cambio climático, conocido por sus iniciales en inglés de IPCC, ha desarrollado cuatro posibles escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero hasta el año 2100, conocidos como escenarios SRES o IEEE, considerando cambios posibles en población global, el grado de globalización, cambios tecnológicos y el grado de uso de fuentes alternas de energía (Nakicenovic & Swart, 2000). Los cuatro escenarios futuros de emisiones son B1 (bajo), B2 (medio), A1 (de medio a alto) y A2 (alto).

Las proyecciones de emisiones se usan con frecuencia para conjeturar sobre el cambio climático futuro; sus supuestos básicos respecto de la evolución socioeconómica, demográfica y tecnológica son el punto de partida de numerosos estudios sobre la vulnerabilidad del cambio climático y las evaluaciones de su impacto en la sociedad (IPCC, 2007). El escenario A1B es un caso particular del escenario A1, que representa un escenario de emisiones medio moderado, el cual asume que la sociedad usará en forma balanceada fuentes energéticas además de las de origen fósil.

Para México, la mayoría de los modelos proyecta un decremento de la precipitación en la mayor parte de su territorio, aunque se espera un incremento de esta variable en otras regiones del mundo. Seager *et al*. (2007) han mostrado que el noroeste del país se encuentra en un proceso de mayor aridez debido a una baja de la precipitación y a un alza en la evaporación.

Considerando el escenario A1B para el estado de Sinaloa, el cuadro 2 muestra los posibles alcances que se tendrán en cuanto a temperaturas medias, señalando los diferentes escenarios de cambio climático, para los periodos P0 (1961-1990), P1 (2011-2040), P2 (2041-2070) y P3 (2071-2098).

Cuadro 2. Alcance de las temperaturas medias para los diferentes escenarios de cambio climático en el estado de Sinaloa (IMTA-INIFAP, 2011).

Variable	Alcance	*P*0	*P*1	*P*2	*P*3
Temperatura media	Anual	24.1	25.2	26.3	27.2
	Junio-octubre	27.9	29.1	30.2	31.1
	Octubre-marzo	21.0	22.1	23.1	24.0
Temperatura máxima media	Anual	31.6	32.2	33.4	34.5
	Junio-octubre	33.9	34.4	35.7	36.8
	Octubre-marzo	29.2	29.8	31.0	32.0
	Mes más caliente	35.6	36.1	37.3	38.2
Temperatura mínima media	Anual	16.8	17.0	18.1	18.9
	Junio-octubre	21.7	22.2	23.2	24.0
	Octubre-marzo	12.7	13.4	14.5	15.3
	Mes más frío	10.1	10.8	12.0	12.8

Cuadro 3. Variabilidad de la precipitación para tres periodos de proyecciones y el periodo base para el estado de Sinaloa (IMTA-INIFAP, 2011).

Variable	*P*0	*P*1	*P*2	*P*3
Precipitación anual	755.8	677.2	663.7	619.8
Precipitación octubre-marzo	176.9	122.6	113.0	96.4
Precipitación junio-octubre	629.5	602.8	598.9	568.6
Precipitación, mes más lluvioso	196.7	193.2	190.3	184.6

Con respecto a la precipitación, el cuadro 3 muestra la variabilidad de la precipitación para tres periodos de proyecciones: P1 (2011-2040), P2 (2041-2070) y P3 (2071-2098), y el periodo base P0 (1961-90), para el estado de Sinaloa.

La agricultura es de las actividades más afectadas por este fenómeno, pues el desarrollo de los cultivos depende del clima (principalmente temperatura). De no realizarse acciones de adaptación y mitigación para Sinaloa, un estado eminentemente agrícola, las repercusiones pueden ser catastróficas para la economía de la entidad.

Impactos potenciales del cambio climático en la agricultura

El cambio climático en los procesos productivos agrícolas debe verse como un problema actual, donde los tomadores de decisiones requieren de información en el proceso de planificación y elaboración de políticas públicas para reducir la vulnerabilidad socioeconómica del sector ante el impacto por la variabilidad y el cambio climático. Los posibles impactos potenciales tanto positivos como negativos son los siguientes:

Impactos positivos

- Posibilidad de nuevos cultivos.
- Mayor periodo para el desarrollo de los cultivos.
- Mayor producción por CO_2 ↑.
- Aceleración de la maduración.
- Reducción en la severidad y duración de heladas.
- Más cosechas por año.

Impactos negativos

- Mayor incidencia de plagas y enfermedades.
- Menor diversidad de cultivos.

ISSN 2007-2422

- Daños a cultivos por calor extremo.
- Ciclones más intensos e inundaciones.
- Menor eficacia de herbicidas y plaguicidas.
- Predicciones menos confiables (planeación difícil).
- Menor producción por acortamiento del ciclo.
- Mayor estrés hídrico y térmico.
- Problemas con el cumplimiento de horas frío.
- Incremento en la demanda pico de riego.
- Necesidad de nuevas variedades.

Ante este panorama, es necesario desarrollar estrategias de adaptación y mitigación para responder con oportunidad al impacto del cambio climático en los sistemas productivos agrícolas.

Gestión de zonas de riego

La operación de zonas de riego, como los distritos, se ha fundamentado en particular en reglas empíricas que se han obtenido con base en la experiencia acumulada por el personal que los opera. Su aplicación no ha permitido optimizar el uso de los recursos agua, tierra, capital y personal disponibles en los distritos del país. Aunque el manejo eficiente del agua en los distritos de riego es conceptualmente simple, en la práctica afronta muchos problemas colaterales de diversa índole (cultural, social, económico y tecnológico); el resultado conjugado se manifiesta en baja eficiencia en el uso del agua. Uno de los factores que más afecta la eficiencia es el procedimiento utilizado para determinar los volúmenes de agua a operar. Las razones principales que afectan su estimación son:

- En muchos casos, el servicio de riego se programa de modo prioritario en función de la facilidad en el manejo hidráulico de la red de distribución y no en las necesidades de agua de los cultivos.
- Cuando se toman en consideración los cultivos, la planeación se efectúa estimando las necesidades hídricas con base en estimaciones generales del uso consuntivo de los cultivos (requerimientos hídricos), y no se toman en cuenta factores fundamentales como el suelo y su variabilidad espacial, y las condiciones meteorológicas.
- En muchos casos, cuando la programación se hace por la demanda de los usuarios, ésta obedece más bien a factores de tipo tradicional o simplemente a la apreciación empírica y subjetiva de necesidad de regar.
- Aunque la naturaleza del problema es conocida, preocupa que las causas se han asimilado como males necesarios, y así se habla de eficiencias de aplicación normales de 60%; este dato, más que indicar eficiencia, refleja graves problemas.

Si bien en los últimos años ha habido una preocupación por mejorar la eficiencia en el uso del agua de riego parcelario, el esfuerzo resulta inconcluso si no se utilizan los medios adecuados y se combinan con el nivel tecnológico actual: desarrollo de la informática y electrónica, y avance científico en las áreas de física de suelos, fisiología vegetal y agroclimatología (Exebio, Palacios, Mejía, & Carmona, 2005).

El papel de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) en la agricultura moderna

La agricultura en el mundo ha sido influida por el nuevo paradigma tecnológico, por lo que se ha favorecido con los enormes avances de la introducción de los recursos informáticos. El uso de tecnologías de la información y la comunicación (TIC) ha cambiado de manera considerable, para bien, el modo de trabajo de agricultores, investigadores y todo el personal en el sector agrícola (Pérez, Milla, & Mesa, 2006). Según González (2003), de acuerdo con el interés expresado por los agricultores, entre las tareas propias de la agricultura que pueden ser objetos de aplicaciones de informática están:

- Consejos técnicos de cultivo: emplear *software* para la resolución de interrogantes

• ISSN 2007-2422

concretas sobre la práctica de cultivos: preparación de suelo, sistema de riego, determinación de ataques de plagas y enfermedades.
- Contabilidad, precios de mercado, cálculo de inversiones, inventario y movimiento, cálculo de insumos agrícolas, etcétera.
- Información y administración fiscal.
- Planificación y manejo de cultivos: selección de áreas de cultivos, proyección de fechas de siembra.
- Cálculo de dosis de plaguicidas: dosis por unidad de área, recomendaciones para su aplicación.
- Meteorología local: llevar registros diarios, mensuales y anuales de lluvias, precipitaciones, humedad relativa, radiación y otras variables meteorológicas de suma importancia en la producción agrícola.

Actualmente se han desarrollado numerosos proyectos TIC aplicados a la agricultura, como los presentados en las Jornadas de Agroinformática (INTA, 2008), el primer y segundo Congreso Argentino de Agroinformática en 2009 y 2010, tomando como ejemplos los siguientes:

- Ambiente de simulación, monitoreo y control remoto de un sistema de riego por goteo.
- Determinación de zonas de manejo mediante relevamiento de suelos y herramientas informáticas.
- Procesamiento digital de imágenes aéreas multiespectrales para la cuantificación de caña de azúcar caída.
- Simulación de la dinámica del carbono en suelos bajo siembra directa y labranza tradicional.
- Sistema de información *Informe de estado hídrico de suelos*.
- Modelo de simulación de fenología de soya.

Los programas de simulación facilitan en gran medida la estimación de las necesidades de agua de los cultivos y, por ende, el cálculo del programa de riego. Además, permiten generar criterios para la planeación y el manejo del riego, con lo cual se da un mejor uso al recurso hídrico (Arteaga, Ángeles, & Vázquez, 2011).

Internet es una herramienta útil para el desarrollo rural y agrícola que aporta nuevas fuentes de información, pudiendo abrir otros canales de comunicación para el sector rural y organizaciones agrícolas. Esta red ofrece un medio para atenuar la brecha que existe entre los profesionales del desarrollo, la población rural y los productores agrícolas a través del diálogo y la interacción. Asimismo, promueve alianzas y redes interpersonales, además de nexos transversales y paralelos entre organizaciones. Los beneficios principales incluyen además una mayor eficiencia en el uso de recursos para el desarrollo, menor duplicación de actividades y costos reducidos de comunicación, así como un acceso global a la información y recursos humanos.

Metodología

Generación del modelo de programación integral del riego

El modelo de programación utilizado fue el generado por Ojeda, Sifuentes, Slack y Carrillo (2004) en el Valle del Fuerte, el cual fue validado en la zona de estudio. El modelo se compone de los parámetros coeficiente de cultivo (K_c), profundidad de raíz (P_r) y factor de abatimiento (F), expresadas como funciones no lineales, cuya variable independiente (X) son los *GDA*, haciéndolas autoajustables a variabilidad climática presente en la amplia temporada de siembra de esta región (de septiembre a enero) y por los efectos del cambio climático (cuadro 4). Estas condiciones causan problemas de adaptación cuando se utilizan parámetros expresados con base en días calendario, como los que se usan tradicionalmente.

Donde K_{co} es el coeficiente de cultivo para la primera etapa fenológica, la cual depende esencialmente de la evaporación del suelo; $K_{máx}$ es el máximo valor de K_c durante su desarrollo; $XK_{máx}$

ISSN 2007-2422

Cuadro 4. Parámetros de calendarización usados en programación integral del riego en papa para el norte de Sinaloa (Ojeda, Sifuentes, Slack, & Carrillo, 2004).

Variable	Modelo	Parámetro
Coeficiente de cultivo	$K_c = K_{máx}\, erfc((\frac{x - x_{Kmáx}}{\alpha_1})^2)$ si $Kc < K_{co}$, entonces $K_c = K_{co}$	$K_{máx} = 1.3$ $XK_{máx} = 0.6$ $\alpha_1 = 0.45$ $Kc_o = 0.2$
Profundidad radical	$P_r = P_{ro} + (P_{rmáx} - P_{ro})\left\{1 - \exp\left[-\frac{(GDA_n)^2}{\alpha_2^2}\right]\right\}$	$P_{ro} = 0.15$ m $P_{rmáx} = 0.7$ m $\alpha_2 = 600$
Factor de abatimiento	$F_n = \alpha_3 - \alpha_4 K_{cn}$	$\alpha_3 = 0.68$ (gravedad), 0.45 (aspersión) $\alpha_4 = 0.1$

corresponde a una variable auxiliar definida por los *GDA* cuando el cultivo tiene su máximo coeficiente de cultivo; α_1 es un parámetro de regresión obtenido mediante ajuste de datos experimentales; *erfc* es la función complementaria del error, y *x* es una variable auxiliar calculada con la siguiente expresión:

$$x = \frac{GDA}{\alpha_o}$$

Donde *GDA* son los grados día acumulados desde la siembra o emergencia hasta un tiempo determinado y α_o son los *GDA* requeridos hasta alcanzar la madurez calculados como ya se explicó.

P_{ro} y $P_{rmáx}$ representan la profundidad de siembra y profundidad máxima de la raíz, respectivamente; el valor α_2 del modelo se ajustó de forma empírica de un valor aproximado a $^2/_3$ del valor *GDA*, donde el cultivo alcanza la profundidad radical máxima. Los valores de los parámetros α_3 y α_4 para el factor de abatimiento *F* se calibraron de modo empírico, considerando la sensibilidad del cultivo al estrés hídrico, y las prácticas de manejo de riego por gravedad y aspersión en la zona.

Los valores experimentales de K_c, *F* y P_r se obtuvieron de dos parcelas sembradas con la variedad *alpha*; ambas parcelas se ubicaron a menos de 1 200 m de una estación climática automatizada; sus características se muestran en el cuadro 5.

Los valores base de K_c usados en las parcelas anteriores fueron los propuestos por Martin, Slack y Pegelow (1996). El parámetro P_r fue el del programa *SCS-Scheduler* v. 2.0 desarrollado por la Universidad del Estado de Michigan, Estados Unidos, y el Servicio de Conservación de Suelos (Shayya, Bralts, & Olmstead, 1990; Shayya & Bralts, 1991).

Desarrollo de la plataforma computacional

La plataforma computacional se integró por tres elementos: 1) enlace climático en tiempo real con la red agroclimática de las zonas productoras, 2) un servidor virtual administrado en el Cevaf y 3) *software Irrimodel* (Sifuentes *et al*., 2013).

Para obtener los datos climáticos en tiempo real de las estaciones agroclimáticas se utiliza el *software Addvantage Pro* conectado a un dispositivo A840 Telemetry Gateway, que es un Radio Telemetry Units (RTU), donde dichos datos se obtienen por medio de Internet, como se muestra en la figura 1. Para lograr la conexión se configura el servidor *Addvantage Pro*, usuario y contraseña, para replicar los datos climáticos de las estaciones conectadas al RTU.

A través del servidor virtual (http://cevaf.redirectme.net) se descarga el programa *Irrimodel* y se almacenan bases de datos de usuario del mismo; una vez descargado, se requiere un usuario y contraseña para su operación. El programa fue desarrollado con una arquitectura

• ISSN 2007-2422

Cuadro 5. Características generales de parcelas experimentales para la generación de los parámetros de calendarización K_c, F y P_r en función de GDA (Ojeda *et al.*, 2004).

Nombre	Sup (ha)	Arcilla (%)	Arena (%)	Humedad aprovechable (mm)	Sistema de riego
GRAV	50	57.8	22.8	14.7	Gravedad (surcos)
ASP	50	51.8	26.8	14.5	Aspersión (pivote central)

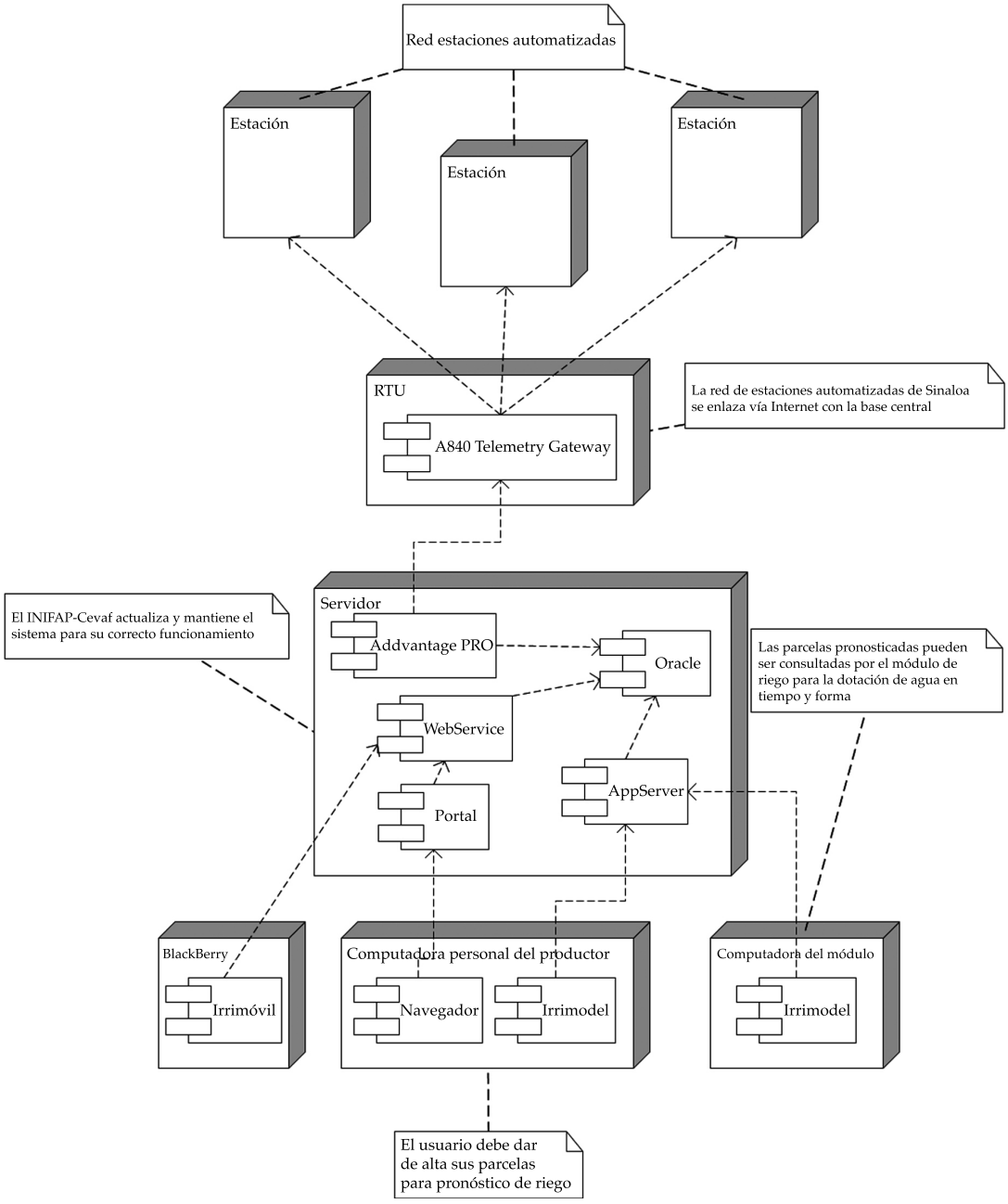


Figura 1. Diagrama de flujo del procesamiento de información climática para calendarización en tiempo real.

ISSN 2007-2422

multicapa usando la tecnología Datasnap de Delphi, que permite separar la lógica de negocio en un servidor de aplicaciones y la presentación con los componentes VCL que pueden interconectarse por medio de Internet usando *DBEXPESS*.

El sistema está diseñado para tres tipos de usuarios: 1) administrador del sistema, 2) productores y técnicos y 3) operadores de módulos de riego. Cada usuario puede tener acceso a una configuración específica del sistema de acuerdo con sus necesidades de operación, la cual es definida en coordinación por el administrador, como se muestra en la figura 2.

Los principales beneficios que ofrece el programa *Irrimodel* son los siguientes:

- Elabora planes de riego para un ciclo biológico completo bajo diferentes escenarios climáticos, de disponibilidad de agua, suelos y sistemas de riego.
- Ajusta cada día la demanda hídrica del cultivo a partir de la siembra y considerando variabilidad climática.
- Pronostica el riego con alto nivel de precisión de acuerdo con el desarrollo del cultivo, determinado por la acumulación de grados día o tiempo térmico (*GDA*).
- Propone indicadores de apoyo para la supervisión y aplicación eficiente del riego.
- Presenta y predice la aparición de etapas fenológicas del cultivo.
- Es un auxiliar en la evaluación del manejo del riego de una o un grupo de parcelas al final de un ciclo agrícola.
- Consulta de bases de datos de clima y humedad de suelo en tiempo real e históricas.
- Además, el programa ofrece la ventaja de mejorar el grado de uso de fertilizantes principalmente nitrogenados y reducir el riesgo de enfermedades, pues es posible mantener niveles óptimos de humedad durante todo el ciclo de desarrollo del cultivo, lo cual ayuda a incrementar de manera significativa la calidad de la producción.

Adopción de la tecnología

Capacitación y soporte técnico

Desde finales de septiembre de 2009 se inició el periodo de capacitación a técnicos y productores en la operación del sistema y sus aplicaciones prácticas. Se tuvo la participación de los productores de papa del norte de Sinaloa a través del Sistema Producto Papa local, también del módulo de riego Santa Rosa, perteneciente al distrito de riego 075 y donde se establecen alrededor de 4 000 ha de papa. Los usuarios que se integraron al programa de capacitación recibieron soporte técnico (agronómico e informático) durante todo el ciclo del cultivo a través del portal o mediante visitas directas.

Establecimiento de parcelas

Durante el proyecto se establecieron dos tipos de parcelas: 1) parcelas piloto donde se tuvo mejor control de la aplicación de la tecnología y 2) parcelas de adopción donde la tecnología la aplicó de modo directo el usuario. Las parcelas que se manejaron como piloto fueron cuatro (cuadro 6), estableciéndose en los municipios de Ahome, Guasave y El Fuerte.

Las parcelas de adopción las manejaron por completo tanto los usuarios que recibieron capacitación en los cursos programados como usuarios que solicitaban integrarse durante el transcurso del ciclo agrícola. La mayoría de estas parcelas se ubicaron en los municipios de Ahome y Guasave, aunque también se establecieron algunas en el municipio de El Fuerte (figura 3).

Resultados y discusión

Nivel de uso de la tecnología

El nivel de uso de la tecnología en las parcelas integradas al sistema fue diferenciada por diversas circunstancias, principalmente de operación interna con cada productor. Para

• ISSN 2007-2422

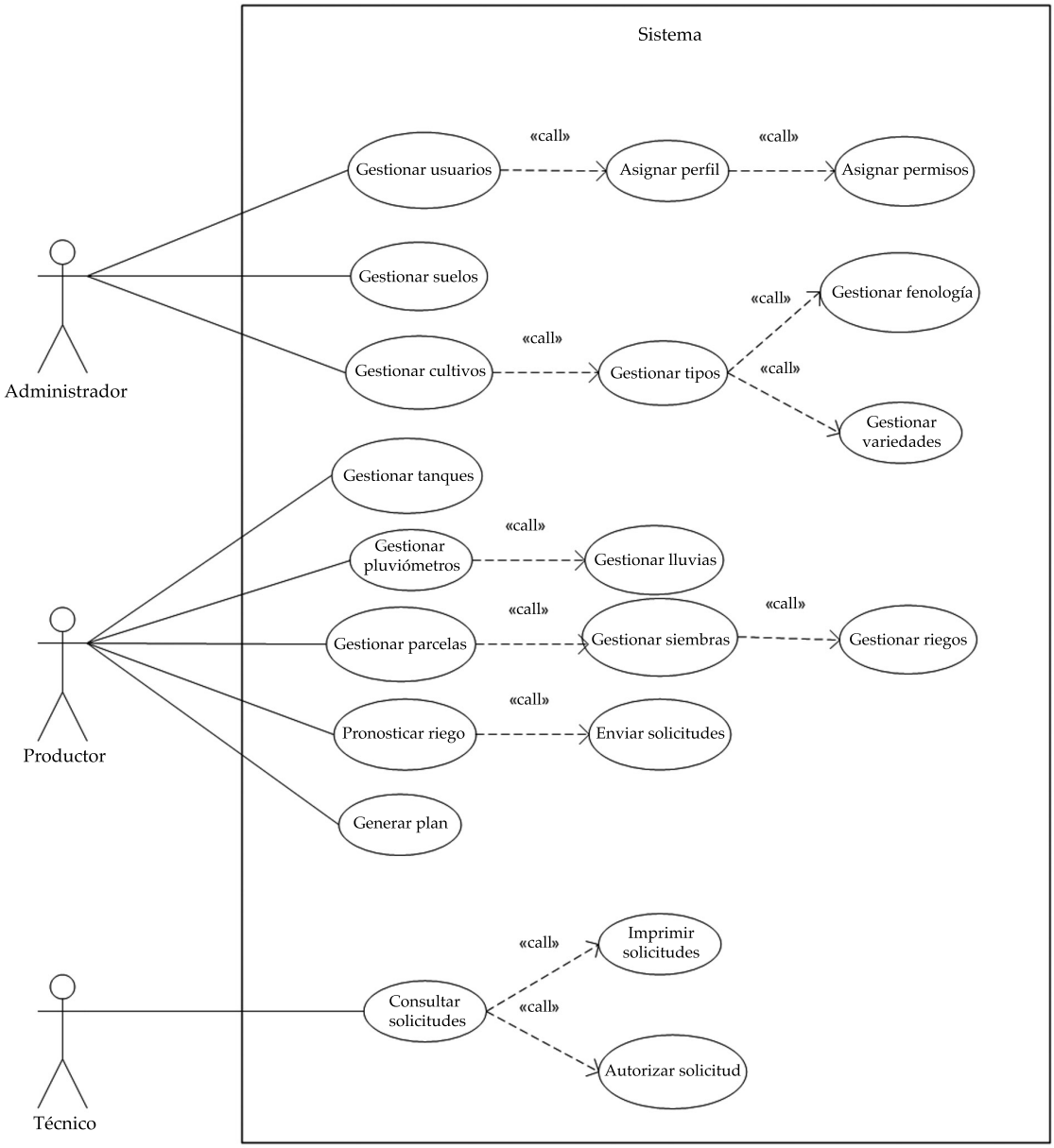


Figura 2. Diagrama de casos de uso del sistema *Irrimodel*.

cuantificar dicha diferenciación se clasificaron dos tipos de parcelas: 1) nivel alto, que aplicaron la tecnología de 90-100%; 2) nivel medio, donde el nivel de aplicación fue en 40-70%. En total se integraron 56 parcelas, que sumaron un total de 3 067.4 ha, de las cuales 1 738.4 fueron de nivel alto y el resto (1 329 ha), nivel medio (cuadro 7).

Análisis de parcelas piloto

Parcela Cevaf

Esta parcela se estableció bajo riego por gravedad usando la variedad fianna, la siembra fue el 11/11/09, con una densidad de 4 semillas·m^{-1}. El método de siembra fue en seco (con riego de

ISSN 2007-2422

Cuadro 6. Características generales de parcelas piloto.

Núm.	Nombre	Superficie (ha)	Suelo	Sistema de riego	Fecha de siembra	Variedad	Ubicación
1	Cevaf	0.2	Arcilloso	Gravedad	11/11/09	Fianna	Cevaf (Guasave)
2	Hugo Gómez	20	Arcillo limoso	Aspersión	29/10/09	Ágata	Km 24, canal valle del Fuerte (El Fuerte)
3	Lote B-41	105.4	Franco arcilloso	Aspersión	28/12/09	Atlantic	Ejido Luisiana (Ahome)
4	Lote B-73	60	Franco arcilloso	Aspersión	19/11/09	FL-1867	Ejido 1º de Mayo (Ahome)
Total		**185.6**					

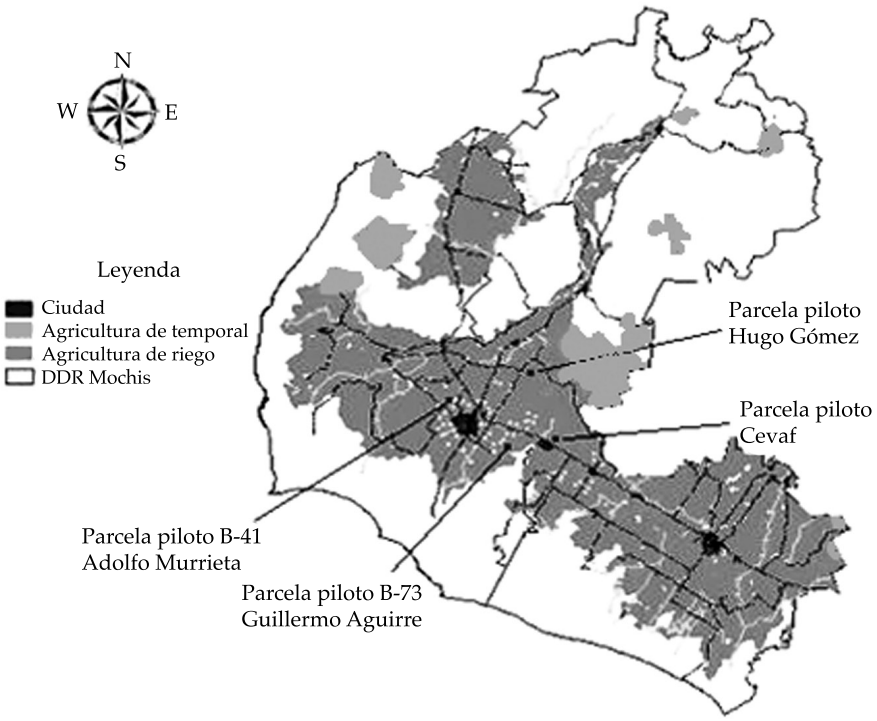


Figura 3. Parcelas de papa (gris claro) donde se está utilizando la tecnología de programación integral y gestión del riego a través de Internet en el Valle del Fuerte.

Cuadro 7. Nivel de uso de la tecnología de gestión de riego por Internet en dos tipos de usuarios de papa en el Valle del Fuerte, ciclo otoño-invierno 2009-2010.

Nivel de uso	Superficie		Número de productores	Número de parcelas	Superficie promedio (ha)	Número de propietarios
	ha	%				
Alto	1 738.4	56.67	9	41	42.4	174
Medio	1 329.00	43.33	8	15	88.60	130
Total	**3 067.40**	**100.00**	**17**	**56**	**54.77**	**304**

• ISSN 2007-2422

germinación inmediato), en surcos con separación de 80 cm y longitud de 80 m. Los riegos aplicados fueron seis, con un requerimiento de hídrico total (lámina neta total) de 36.39 cm y láminas netas de 5.61 a 6.3 cm en los riegos de auxilio. La lámina bruta total (lámina aplicada) fue de 57.74 cm con una eficiencia promedio de 63.02%.

La parcela que se usó como testigo fue el lote 9 de Diciembre de nueve hectáreas con condiciones de suelo, variedad, fecha de siembra y sistema de riego similares. Esta parcela se ubicó en el municipio de Ahome, a un costado del poblado Benito Juárez, dentro del módulo de riego Santa Rosa. Los riegos aplicados fueron seis, incluyendo el riego de presiembra, con una lámina de riego aplicada de 78 cm y una eficiencia promedio de 51% (12% menor que la obtenida en la parcela Cevaf).

La figura 4 muestra una comparación de estas dos parcelas, utilizando siete variables: rendimiento, lámina neta, riegos aplicados, lámina bruta, eficiencia, volumen y productividad del agua. En la parcela Cevaf se obtuvo un rendimiento de 43.06 t·ha^{-1}, mientras que en la testigo fue de 38 t·ha^{-1}; la lámina aplicada se redujo en 20 cm (2 000 m^3·ha^{-1}) con respecto al testigo. Se estimó una productividad del agua de 7.33 kg·m^{-3} y 4.87 kg·m^{-3} para la parcela Cevaf y testigo, respectivamente.

Además de lo anterior, se presentó una mejora importante en la calidad del tubérculo. La parcela manejada con la tecnología del proyecto permitió incrementar en más de 20% los tubérculos de primera clase con respecto al testigo y reducir el número de tubérculos de tercera (3.5 cm de diámetro menor) (figura 5).

Parcela Hugo Gómez Arroyo

Esta parcela se estableció bajo riego por aspersión (pivote central), con surcos a 90 cm de separación. Se utilizó la variedad ágata con fecha de siembra de 29/11/09 y una densidad de 4 semillas·m^{-1}, aplicándose el primer riego en presiembra, con fecha de 11/10/09. En total se aplicaron nueve riegos, incluyendo riego de presiembra con un requerimiento hídrico total de 39.39 cm y láminas netas en cada riego de 4.18 a 6.11 cm. La lámina bruta total fue de 46.96 cm, con una eficiencia promedio de 83.87% (cuadro 8).

Lote B-41

El sistema de riego de esta parcela fue por aspersión (avance frontal). Se estableció la variedad atlantic con fecha de siembra de 08/12/09,

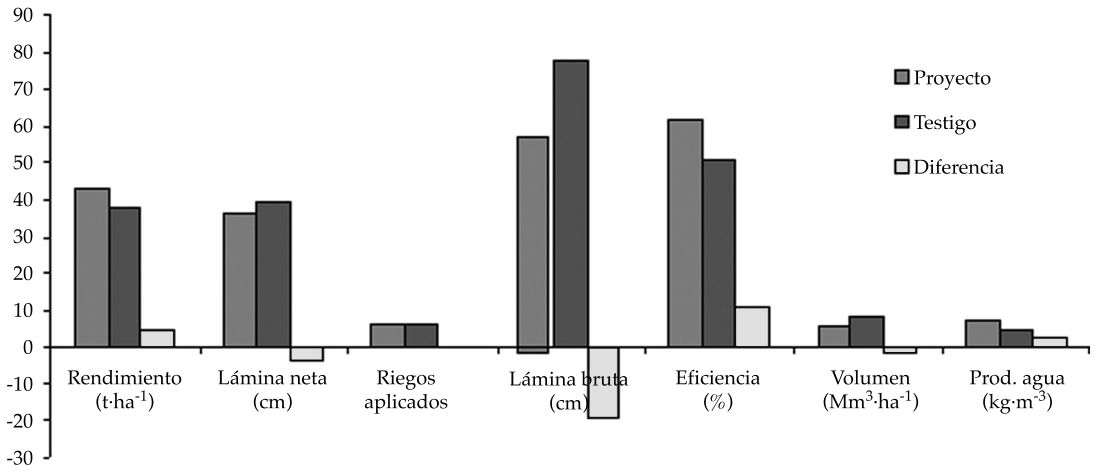


Figura 4. Resultados obtenidos en parcela de papa manejada con la tecnología de proyecto comparada con un testigo en el Valle del Fuerte, Sinaloa, ciclo 2009-2010.

ISSN 2007-2422

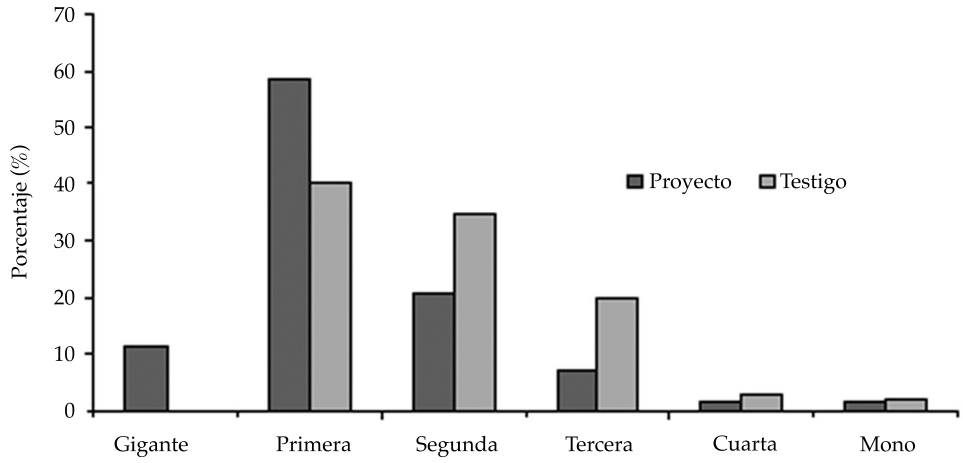


Figura 5. Distribución de la calidad de la cosecha en parcela Cevaf comparada con un testigo (lote 9 de Diciembre).

Cuadro 8. Riegos aplicados en parcela piloto Hugo Gómez Arroyo programados considerando variabilidad climática, en el Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa, ciclo otoño-invierno 2009-2010.

Número de riego	Fecha de riego	Días al riego	Intervalo (días)	Lámina neta (cm)	Lámina bruta (cm)	Eficiencia (%)	Etapas
1	11/10/2009	-	-	8.81	10.15	86.80	Riego presiembra
2	16/11/2009	17	17	3.31	4.65	71.18	Brotación
3	25/11/2009	28	11	3.62	4.53	79.91	Inicio de estolonización
4	04/12/2009	37	9	3.84	4.16	92.30	Inicio de estolonización
5	14/12/2009	47	10	4.01	4.16	96.39	Inicio de estolonización
6	23/12/2009	56	9	4.90	4.96	98.79	Inicio de estolonización
7	04/01/2010	67	11	3.85	4.91	78.41	Inicio de tuberización (diám: > 1 cm)
8	14/01/2010	77	10	3.81	4.54	83.92	Inicio de tuberización (diám: > 1 cm)
9	23/01/2010	86	9	3.24	4.91	65.98	Desarrollo de tubérculos (diám: 3-5 cm)
				39.39	**46.97**	**83.87**	

con una densidad de 4 semillas·m^{-1}. Los riegos aplicados fueron siete en total (incluido el de presiembra), con un requerimiento de riego total (lámina neta total) de 35.59 cm y láminas requeridas en cada riego de auxilio de 3.8 a 5.12 cm. La lámina bruta total (lámina aplicada) fue de 41.07 cm, con una eficiencia promedio de 86.65% (cuadro 9).

Lote B-73

En esta parcela se estableció la variedad FL-1867, con fecha de siembra de 19/11/09, con una densidad de 4 semillas·m^{-1}. Los riegos aplicados fueron ocho en total con riego por aspersión (pivote central). El requerimiento hídrico total fue de 30.47 cm y láminas requeridas en cada riego de 3.8 a 5.11 cm. La lámina bruta total fue de 41.88 cm, con una eficiencia promedio de 72.75%.

Análisis global

Este análisis se realizó con los resultados obtenidos de las parcelas con nivel de uso alto, para tener una estimación de los alcances de esta

• ISSN 2007-2422

Cuadro 9. Riegos aplicados en el lote B-41 programados considerando variabilidad climática, en el Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa, ciclo otoño-invierno 2009-2010.

Número de riego	Fecha de riego	Días al riego	Intervalo (días)	Lámina neta (cm)	Lámina bruta (cm)	Eficiencia (%)	Etapa
1	07/11/2009	-	-	10.45	11.80	88.52	Riego de germinación
2	02/12/2009	-	-	3.86	3.89	99.22	Riego de germinación
3	15/01/2010	38	38	3.49	4.84	72.10	Emergencia
4	28/01/2010	51	13	3.62	4.96	72.98	Inicio de estolonización
5	10/02/2010	63	12	4.53	5.00	90.68	Inicio de tuberización (diám: > 1 cm)
6	22/02/2010	75	12	4.78	5.70	83.94	Inicio de tuberización (diám :> 1 cm)
7	06/03/2010	88	13	4.85	4.88	99.48	Desarrollo de tubérculos (diám: 3-5 cm)
				35.59	**41.07**	**86.65**	

tecnología en el ámbito comercial. Este grupo de parcelas se compararon con otro grupo tomado al azar con manejo tradicional, ubicado dentro del módulo de riego Santa Rosa, perteneciente al DR-075, en un área de 4 000 ha de papa, analizando por separado tanto las parcelas bajo riego por gravedad (396 ha) como las de riego por aspersión (1 334 ha). Las variables que se analizaron fueron eficiencia en el uso del agua, rendimiento, productividad del agua y requerimientos hídricos por fecha de siembra.

Eficiencia en el uso del agua

En riego por gravedad, la eficiencia de aplicación de todas las parcelas evaluadas fue mayor a la eficiencia promedio de la zona, que es de 51%. El incremento observado fue desde 5 hasta 30%; es decir, que es posible obtener eficiencias de aplicación hasta de 80% con el apoyo de esta tecnología (figura 6).

El comportamiento de las eficiencias de aplicación en riego por aspersión fue similar al de gravedad; la eficiencia promedio de la zona fue de 78%, mientras que la obtenida en 10 de las 12 parcelas evaluadas fluctuó de 81 a 97%; las dos restantes estuvieron por debajo de la media de la zona; es decir, mediante un manejo científico, es posible un incremento máximo hasta de 19% (figura 7).

Análisis de rendimiento

Se encontró un rendimiento promedio en la zona de análisis de 27 t·ha^{-1}. Cabe mencionar que el rendimiento medio estatal es de 26 t·ha^{-1}. En las parcelas bajo riego por gravedad manejadas con el sistema sólo una de las 13 parcelas no superó la media (semillero caña), como se observa en la figura 8. En esta variable destacan las parcelas Cevaf, Remolacha y Viuda, con 43, 40 y 33 t·ha^{-1}, respectivamente; es decir, un incremento de 16, 13 y 6 t·ha^{-1} de manera respectiva.

El promedio de rendimiento en riego por aspersión en la zona fue de 35 t·ha^{-1}, por lo que la mayoría de las parcelas se mantuvo en este valor, con excepción de tres parcelas (figura 9), cuyo rendimiento fue cercano a las 44 t·ha^{-1}. Cabe mencionar que una de estas tres parcelas fue parcela piloto.

Productividad del agua

Esta variable es una de las más importante desde el punto de vista ambiental y económico, pues es un indicador de la eficiencia de los sistemas de producción para transformar el insumo agua en producto, que a su vez se transformará en beneficios para la sociedad, como alimento y bienes materiales. En las 13 parcelas manejadas bajo riego por gravedad sólo dos no superaron

ISSN 2007-2422

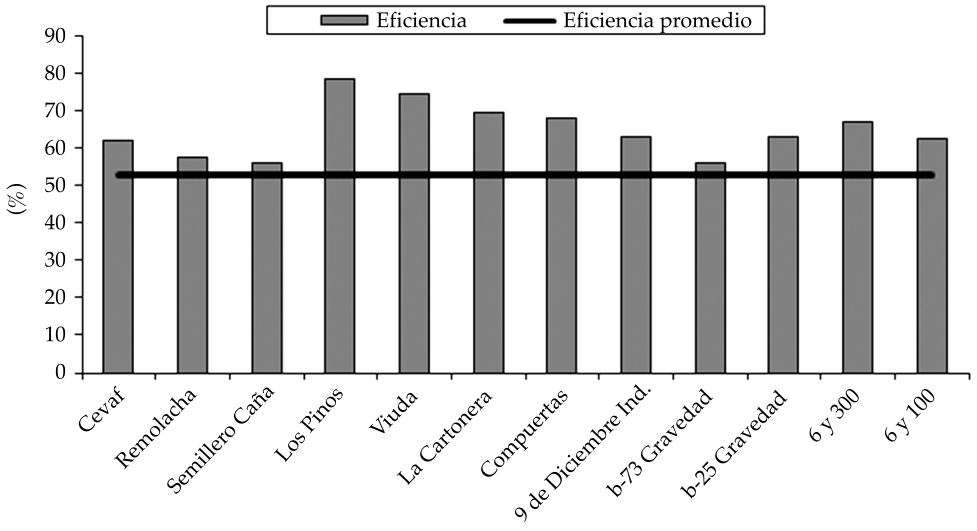


Figura 6. Eficiencia de riego en parcelas de papa manejadas con la tecnología bajo riego por gravedad comparadas con eficiencia promedio.

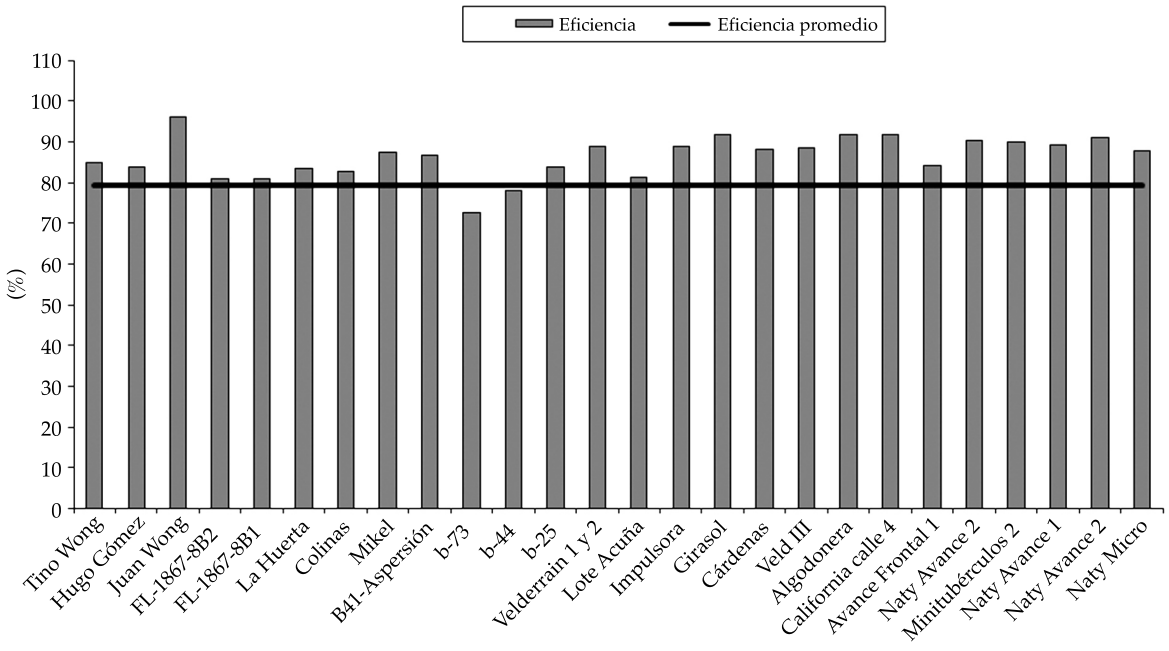


Figura 7. Eficiencia de riego en parcelas bajo riego por aspersión manejadas con programación integral comparadas con la eficiencia promedio.

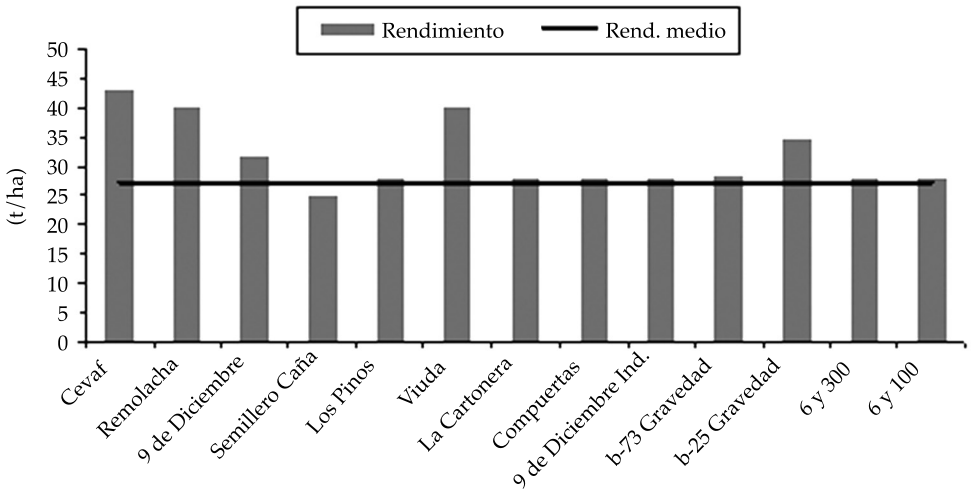


Figura 8. Rendimiento obtenido en parcelas bajo riego por gravedad con la tecnología comparada con el promedio de una zona representativa.

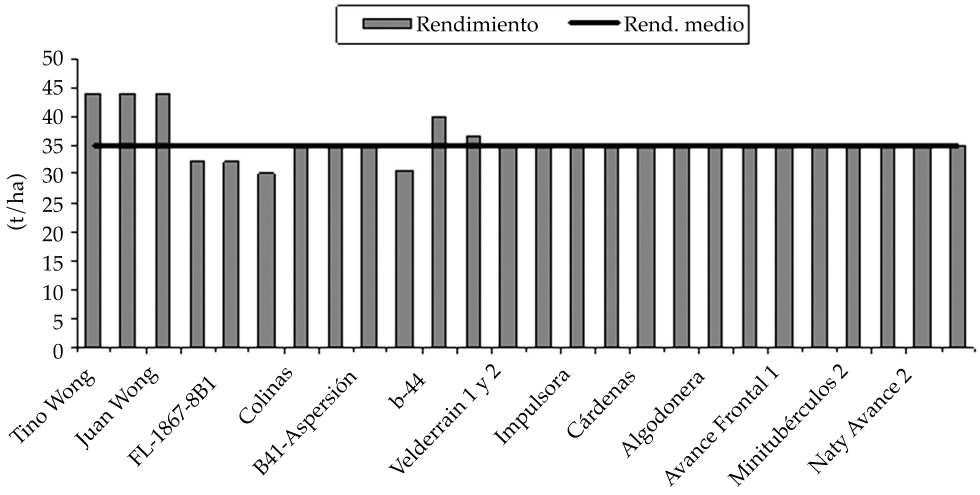


Figura 9. Rendimiento obtenido en parcelas bajo riego por aspersión con la tecnología comparada con el promedio de una zona representativa.

la productividad media, que fue de 4.2 kg·m^{-3}, el resto osciló entre 4.7 y 7.3 kg·m^{-3}. El valor máximo lo obtuvo la parcela Cevaf, donde se tuvo un mejor control en la aplicación adecuada de la tecnología.

Bajo riego por aspersión, el incremento en productividad del agua fue más significativo, contrastando con el rendimiento. Ello indica

la capacidad que tienen estos sistemas para aplicar láminas bajas y mantener la humedad del suelo óptima con el apoyo de la tecnología de programación integral del riego. Se observó una fluctuación de la productividad del agua desde 6.5 hasta 11 $kg \cdot m^{-3}$, mientras que la media fue de 6.1 $kg \cdot m^{-3}$.

Impactos potenciales de la tecnología

Impactos ambientales

Un mejor manejo de la calendarización del riego se traduce en un mejor control de la salinidad y contaminación ambiental. El uso del sistema para la aplicación precisa de los riegos dará una mayor certidumbre y confianza a los agricultores para programar sus riegos. Se espera que esta tecnología podrá ayudar a reducir en un 20% la lámina convencional aplicada al cultivo de papa, que representa 1 800 $m^3 \cdot ha^{-1}$ sin efecto negativo en el rendimiento. Lo anterior permitirá reducir la cantidad de nitrógeno aplicado, que en la actualidad es de 200 unidades por hectárea.

Impactos económicos

El cultivo de la papa en el norte de Sinaloa aporta cerca de 20% de la derrama económica total, que equivale a cerca de 1 400 millones de pesos. El uso y manejo de esta tecnología repercute no sólo en un menor volumen de riego, sino también en el aseguramiento de los rendimientos potenciales, al acoplar el requerimiento hídrico de los cultivos con las condiciones climáticas.

Impactos tecnológicos

Ante la falta de herramientas científicas de fácil acceso y uso, los agricultores aplican sus insumos de manera empírica, por lo que la gestión del riego a través de Internet es una herramienta indispensable para iniciar un cambio tecnológico en la manera de programar y aplicar el riego. La presente tecnología sienta las bases para reducir la incertidumbre en los sistemas de producción de papa, generada, entre otras cosas, por el clima, acorde con los adelantos tecnológicos actuales y la competencia que con mayor frecuencia enfrentan los agricultores.

Impactos sociales

Cada vez son más los agricultores que tienen acceso a Internet. La plataforma computacional sin duda iniciará una nueva etapa en la agricultura sinaloense, al poner a disposición de los agricultores y de la sociedad una nueva forma de presentar y transferir el conocimiento. Esta herramienta ayudará a promover de forma rápida la cultura del agua y reducir problemas sociales generados por la disputa de este recurso. De acuerdo con Massieu (2004), la papa genera 90 $jornales \cdot ha^{-1}$, que en Sinaloa representan alrededor de 1 260 000.

Conclusiones

- Se cuenta con una plataforma computacional robusta para gestión del riego por Internet enfocada a variabilidad y cambio climático, preparada para incorporar otros cultivos y aplicaciones agrometeorológicas.
- El manejo del riego a través de Internet con el programa *Irrimodel* permite involucrar a gran número de productores.
- Es posible lograr eficiencias en el uso del agua de 60 a 80% en riego por gravedad, de 85 a 90% en aspersión y de 95% en goteo, además de mejorar la calidad y cantidad de sus rendimientos. Con esta herramienta también se logran potenciar otros insumos, como fertilizante, al reducir los periodos de estrés hídrico y láminas aplicadas por sobrerriego.
- El sistema también contribuirá a mejorar el servicio de riego de los módulos hacia el usuario, pues el supervisor de riego podrá atender casi en tiempo real las solicitudes que genere el productor a través de Internet y tener una mejor operación de los canales.
- Se cuenta con una excelente herramienta para reducir los efectos negativos de eventos extremos como sequías prolongadas y

• ISSN 2007-2422

heladas, representando también una opción de adaptación al cambio climático.

Referencias

Arteaga, R. R., Ángeles, M. V., & Vázquez, P. M. A. (2011). Programa *Cropwat* para planeación y manejo del recurso hídrico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *2*(2):179-195.

Avery, E. R. (1983). *Potato Diseases* (238 pp.) Durham New Hampshire, United Kingdom: Department of Botanic and Plant Pathology, University of New Hampshire.

Dudek, D. J., Gerald, L. H., & Marshall, J. E. (1981). *The Derived Demand for Irrigation Scheduling Services*. Recovered from http://www.ageconsearch.umn.edu/bitstream/32586/1/06020217.pdf.

Exebio, G. A., Palacios, V. E., Mejía, S. E., & Carmona, V. R. (2005). Metodología para estimar pérdidas por infiltración en canales de tierra. SMCS. *Terra Latinoamericana*, *23*(2):213-223.

FAO (1986). *Yield Response to Water* (189 pp.). Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome: FAO.

González, B. H. (2003). *Informática y agricultura*. Guatemala: Centro de Telemática, Facultad de Agronomía, USAV. Recuperado de http://www.iespana.es/byron/public/nfoagric.pdf.

IMTA-INIFAP (2011). *Proyecto: Evaluación del impacto del cambio climático en la productividad de la agricultura de riego y temporal del estado de Sinaloa. Informe final* (390 pp.). Jiutepec, México: IMTA-INIFAP.

INTA (2008). *Jornadas de agroinformática*. Recuperado de http://www.inta.gov.ar/actual/congreso/jaiio/trabajos.htm.

IPCC (2007). *Cambio climático 2007: informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del IPCC* (p. 104). En R. K.Pachauri, & A. Reisinger (Eds.). Ginebra: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).

Jefferies, R. A., & Lawson, H. M. (1991). A Key for the Stages of Development of Potato (Solanumtuberosum). Invergowrie, Dundee, United Kingdom. Scottish Crop Research Institute. Ann. App. Biol. *119*: 387-389.

Marek, T. H., Scherer, T., Porter, D., Rogers, D., Henggeler, J., & Howell, T. A. (2010). *What will it take to Get Irrigators to Use Advisory Programs? Lessons Learned from the Past 10 Years and Beyond*. 5th National Decennial Irrigation Conference Sponsored jointly by ASAE and the Irrigation Association Phoenix Convention Center, Phoenix, Arizona.

Martin, E. C., Slack, D. C., & Pegelow, E. J. (1996). *Crop Coefficients for Vegetables in Central Arizona* (pp: 381-386). In Proceedings of the International Conference. Evapotranspiration and Irrigation Scheduling. Ame. Soc. of Agric. Eng.

Massieu, T. Y. C. (2004). Aportes. *Revista de la Facultad de Economía Universidad Autónoma de Puebla*, *9*(16).

Nakicenovic, N., & Swart, R. (Eds.) 2000. *Special Report on Emissions Scenarios* (612 pp.). Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Ojeda, B. W., Sifuentes, I. E., Slack, D. C., & Carrillo, M. (2004). Generalization of Irrigation Scheduling Parameters Using the Growing Degree Days Concept: Application to a Potato Crop. *Irrigation and Drainage*, *53*: 521-261.

Ojeda, B. W., Sifuentes, I. E., & Unland, W. H. (2006). Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa. *Agrociencias*, *40*: 13-25.

Ojeda, W., Martínez, P., & Hernández, L. (2008). Repercusiones del cambio climático en la agricultura de riego. Capítulo 6. En *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México*. Vol. II. A. Aguilar & P. Martínez (Eds.). Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Parker, D., Cohen-Vogel, D. R., Osgood, D. E., & Zilberman, D. (May-June, 2000). Publicly funded Weather Database Benefits Users Statewide. *California Agriculture*, *54*(3):21-25.

Pérez, A., Milla, M., & Mesa, M. (2006). Impacto de las tecnologías de la información y la comunicación en la agricultura. *Revista Cultivos Tropicales*, 27(1). Recuperado de http://www.inca.edu.cu/otras_web/revista/pdf/2006/1/CT27113.pdf.

Sagarpa (2010). *Avance mensual por cultivos por estado*. México: Sagarpa. Recuperado de http://www.siap.gob.mx/.

Seager, R., Ting, M., Held, I., Kushnir, Y., Lu, J., Vecchi, G., Huang, H., Harnik, N., Leetmaa, A., Lau, N., Li, C., Velez, J., & Naik, N. (2007). Model Projections of an Imminent Transition to a More Arid Climate in Southwestern North America. *Science*, *316*: 1181-1184.

Shayya, W. H., & Bralts, V. F. (1991). *Guide to SCS Microcomputer Irrigation Scheduling Package, SCS-Scheduler Version 2.0* (50 pp.). Michigan, USA: Departament of Agricultural Engineering, Michigan State University.

Shayya, W. H., Bralts, V. F., & Olmstead, T. R. (1990). A General Irrigation Scheduling Package for Microcomputers. *Computers and Electronics in Agriculture*, *5*:197-212.

Sifuentes, I. E., Quintana, Q. J., Macías, C. J., & González, C. V. (2013). *"Irrimodel" Programación integral y gestión del riego a través de Internet. Manual del usuario. Versión 1.0* (44 pp.). Guasave, México: INIFAP-Cirnocevaf.

Sifuentes, I. E., Macías, C. J., Apodaca, S. M. A., & Cortez, M. E. (2009). Predicción de la fenología de papa (principios y aplicaciones prácticas) (54 pp.). En *Folleto Técnico 32*. Los Mochis, México: INIFAP-CIRNO.

UCLA (2006). *Integrated Pest Management for Potatoes in the Western United Stated. Agricultural and Natural Resources* (167 pp.) (2ª ed.). Publicación 3316. Oakland, USA: Universidad de California.

Dirección institucional de los autores

M.C. Ernesto Sifuentes
M.C. Jaime Macías

INIFAP-Campo Experimental Valle del Fuerte
km 1609, carretera internacional México-Nogales
81110 Juan José Ríos, Guasave, Sinaloa, México
Teléfono: +52 (55) 3871 8700, extensión 81503
sifuentes.ernesto@inifap.gob.mx
macias.jaime@inifap.gob.mx

Dr. Waldo Ojeda

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, México
Teléfono: +52 (777) 329 3600
wojeda@tlaloc.imta.mx

M.C. Víctor M. González

H. Ayuntamiento de Ahome
Jardín Botánico "Benjamin F. Johnston"
Cuauhtémoc esq. Degollado Col. Bienestar s/n
81280 Los Mochis, Sinaloa, México
Teléfono: +52 (668) 8164 000
gcvictorm@gmail.com

M.C. Daniel A. Salinas, MC. José G. Quintana

Universidad Autónoma de Sinaloa
Prol. Ángel Flores y Justicia Social s/n
Ciudad Universitaria
81223 Los Mochis, Sinaloa, México
Teléfonos: + 52 (668) 8186 538 y 8186 500
daniel@ingenieria.lm.uasnet.mx
quintana.josegpe@gmail.com

Haga clic aquí para escribir al autor

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.

Riego por gravedad convencional en el cultivo de papa, en el norte de Sinaloa, México.

Foto: Fredy González Hernández.

Guía para colaboradores

La revista ***Tecnología y Ciencias del Agua***, invita a los especialistas a colaborar con artículos o notas técnicas **inéditos, relacionados con el agua, derivados de una investigación, que brinden aportaciones originales** y se desarrollen dentro de la hidrología, hidráulica, gestión del agua, agua y energía, calidad del agua, ciencias físicas, biológicas y químicas, así como ciencias políticas y sociales, entre otras disciplinas, conforme a las normas que se enunciarán a continuación.

PREPARACIÓN DEL ARTÍCULO

FORMATO

Tipo de letra: Palatino en todo el documento (cuerpo del texto, cuadros e ilustraciones).

tamaño de letra: el documento se presentará en ocho, nueve, diez y veinte puntos de acuerdo con el siguiente cuadro:

8 puntos (Palatino)	9 puntos (Palatino)
• Cuadros. • Figuras. • Agradecimientos.	• Nombre de los autores. • Institución de los autores. • Resumen. • *Abstract* y *keywords*. • Dirección institucional de los autores.
10 puntos (Palatino)	**20 puntos versales (Palatino)**
• Cuerpo del texto. • Título del trabajo en inglés.	• Título del trabajo en español.

interlineado: doble espacio.

numeración de páginas: todas las páginas deben ir numeradas.

Extensión
***Artículo técnico*:** **treinta páginas** (numeradas), incluyendo figuras y cuadros.
***Nota técnica*:** **diez páginas** (numeradas), incluyendo figuras y cuadros.

CONTENIDO

Contenido
El artículo deberá presentar aportes significativos al conocimiento científico y tecnológico dentro de la especialidad; se basará en trabajos terminados o que hayan cumplido un ciclo en su desarrollo; mostrará resultados de una serie de experiencias de un año o más de investigación y estará respaldado por una revisión bibliográfica adecuada. **La estructura básica del texto deberá contener una introducción, el desarrollo y las conclusiones**. De preferencia, seguir el esquema clásico: resumen (abstract), introducción, metodología, resultados, discusión, conclusiones y referencias.

Título
El título, **redactado en español e inglés**, deberá ser informativo, sin que exceda de 12 palabras.

Resumen
El resumen, **redactado en español e inglés** (*abstract*), deberá ser conciso y proporcionar un amplio panorama de la investigación (objetivo, método, resultados y conclusiones), sin que sobrepase las 250 palabras.

Palabras clave
Se debe proporcionar una relación de ocho palabras o frases clave (máximo) redactadas **en español e inglés** (*keywords*), que faciliten la recuperación de la información.

Pies de página
No se admiten. Deberán incorporarse al texto.

Agradecimientos
Se incluirán después del texto y antes de las referencias.

Cuadros
- Deberá usarse una página para cada cuadro.
- Después de las referencias se presentará la lista de todos los cuadros que se citen.

Figuras
- Deberá usarse una página para cada figura.
- Todos los nombres de las figuras deberán incluirse después de los cuadros.
- Deberán tener alta resolución (300 dpi).

Nota: cuando el artículo se apruebe para publicación, el autor deberá remitir cada figura en archivo JPG, en alta resolución (300 dpi).

Referencias
- Toda la bibliografía debe estar referenciada en el cuerpo principal del documento.
- En el caso del abordaje de temas del dominio común en el ámbito científico y tecnológico, deberán citarse trabajos que denoten el conocimiento de los autores sobre el estado del arte.
- En la medida de lo posible, evitar las autocitas.
- Se tomará como base el formato APA de citación.

Algunos ejemplos con base en el formato APA:

Libros completos

Apellido, A. A. (Año). Título del trabajo. Ciudad de edición: Editorial.
Apellido, A. A. (Año). Título del trabajo. Recuperado de http://www.xxxxx
Apellido, A. A. (Año). Título del trabajo. doi:xxxxx
Apellido, A. A. (Ed.). (año). Ciudad de edición: Editorial.

Capítulos de libros

Apellido, A. A., & Apellido, B. B. (Año). Título del capítulo o entrada. En A. Apellido, B. Apellido & C. Apellido (Eds.), Título del libro (pp. xxx-xxx). Lugar: Editorial.
Apellido, A. A., & Apellido, B. B. (Año). Título del capítulo o entrada. En A. Editor & B. Editor (Eds.), Título del libro (pp. xxx-xxx). Recuperado de http://www.xxxxxxx

Artículo o nota de publicación periódica recuperado de la web

Apellido, A. A., & Apellido, B. B. (Año). Título del artículo. Título de la publicación, volumen(número), pp. Recuperado de http:// www.xxxxxxx

Esto es: Apellido, A. A., & Apellido, B. B. (Año). Título del artículo. Título de la publicación, 1(2), 5-17. Recuperado de http:// www.xxxxxxx

Artículo o nota de publicación periódica impresa

Apellido, A. A., & Apellido, B. B. (Año). Título del artículo. Título de la publicación, 8(1), 73-82.

Artículo de publicación periódica con DOI

Apellido, A. A., Apellido, B. B., & Apellido, C. C. (Año). Título del artículo. Título de la publicación, 8(1), 73-82, doi:xxxxxx

Congresos y simposia

Colaborador, A. A., Colaborador, B. B., Colaborador, C. C., & Colaborador, D. D. (Mes, año). Título de la colaboración. En E. E. Presidente (Presidencia), Título del simposio. Simposio llevado a cabo en la conferencia de Nombre de la Organización, Lugar.

Idioma

Español o inglés.

Separación de números y uso de punto decimal

En *Tecnología y Ciencias del Agua* se marcará la división entre millares con un espacio en blanco; mientras que para separar los números enteros de sus fracciones, cuando las haya, se usará el punto.

Al respecto, se retoma lo que indica el *Diccionario panhispánico de dudas*, editado por la Real Academia Española y la Asociación de Academias de la Lengua Española, en 2005, sobre las expresiones numéricas: "**se acepta el uso anglosajón del punto, normal en algunos países hispanoamericanos…: π = 3.1416.".**

Envío del artículo

Enviar el artículo en *Word* con nombre de autores y dirección institucional a **revista.tyca@gmail.com**, con copia a la licenciada Elizabeth Peña Montiel, elipena@tlaloc.imta.mx.

Información general

Una vez recibido el material, comenzará un proceso de revisión, durante el cual es posible que el manuscrito se rechace; si el texto es susceptible de ser dictaminado, pues cumple a cabalidad con la Política Editorial y así lo considera el Consejo Editorial, pasará a la etapa de arbitraje.

De acuerdo con el proceso de arbitraje, el texto puede ser aceptado sin cambios, con cambios menores, cambios mayores o ser rechazado.

Al ser publicado un trabajo, el autor principal tiene derecho, en forma gratuita a dos revistas y diez sobretiros.

En caso de cualquier duda, escribir a la licenciada Helena Rivas López, hrivas@tlaloc.imta.mx o a la licenciada Elizabeth Peña Montiel, elipena@tlaloc.imta.mx.

Citas dentro del cuerpo del texto

Tipo de cita	Primera cita en el texto	Citas subsecuentes en el texto	Formato entre paréntesis, primera cita en el texto	Formato entre paréntesis, citas subsecuentes en el texto
Un trabajo por un solo autor	Apellido (Año)	Apellido (Año)	(Apellido, año)	(Apellido, año)
Un trabajo por dos autores	Apellido y Apellido (Año)	Apellido y Apellido (Año)	(Apellido & Apellido, Año)	(Apellido & Apellido, Año)
Un trabajo por tres autores	Apellido, Apellido y Apellido (Año)	Apellido *et al*. (Año)	(Apellido, Apellido, & Apellido, año)	(Apellido del primer autor *et al*., año)
Un trabajo por cuatro autores	Apellido, Apellido, Apellido y Apellido (Año)	Apellido *et al*. (Año)	(Apellido, Apellido, Apellido, & Apellido, año)	(Apellido del primer autor *et al*., año)
Un trabajo por cinco autores	Apellido, Apellido, Apellido, Apellido y Apellido (Año)	Apellido *et al*. (Año)	(Apellido, Apellido, Apellido, Apellido, & Apellido , año)	(Apellido del primer autor *et al*., 2008)
Una obra por seis o más autores	Apellido del primer autor *et al*. (Año)	Apellido del primer autor *et al*. (Año)	(Apellido del primer autor *et al*., Año)	(Apellido del primer autor *et al*., año)
Grupos (identificados fácilmente a través de abreviaturas) como autores	Nombre completo de la institución (Siglas, año)	Siglas (Año)	(Nombre completo de la institución [siglas], año)	(Institución, año)
Grupos (sin abreviaturas) como autores	Nombre completo de la institución (año)	Nombre completo de la institución (año)	(Nombre completo de la institución, año)	

Política Editorial

Misión

Difundir el conocimiento y los avances científicos y tecnológicos en materia de agua, a través de la publicación de artículos y notas técnicas inéditas, que brinden aportaciones originales.

Nuestros principios

- Imparcialidad.
- Objetividad.
- Honestidad.

Nuestros valores

- Conocimiento.
- Experiencia.
- Autoridad temática.

Contenido

Interdisciplinario, 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*.

Contenido

Artículos técnicos

La sustentabilidad de la agricultura de riego ante la sobreexplotación de acuíferos 5
Oscar Luis Palacios-Vélez
Bernardo Samuel Escobar-Villagrán

Sistemas de agua potable rurales. Instituciones, organizaciones, gobierno, administración y legitimidad 17
Emmanuel Galindo
Jacinta Palerm

Variabilidad de la huella hídrica del cultivo de cereales, río Cachapoal, Chile 35
Vanessa Novoa
Octavio Rojas
José Luis Arumí
Claudia Ulloa
Roberto Urrutia
Anny Rudolph

Agua virtual en un marco insumo-producto para la cuenca del valle de México 51
Lilia Rodríguez-Tapia
Jorge A. Morales-Novelo
Fabiola S. Sosa-Rodríguez
Juan Carlos Altamirano-Cabrera
Francisco Torres-Ayala

Evaluación de la sostenibilidad de cuencas mediterráneas semiáridas. Caso de estudio: cuenca del Segura, España 67
Javier Senent-Aparicio
Julio Pérez-Sánchez
Alicia María Bielsa-Artero

Metodología para la delimitación y caracterización de humedales en escalas 1:50 000 y 1:20 000 85
Jorge Brena
Cervando Castillo
Ana Wagner

Modelación del riesgo de inundaciones en el estado de Tabasco en el periodo 1961-2007 99
Ana Laura Reyes-Olvera
Eduardo Gutiérrez-González

Relaciones entre parámetros de los modelos de infiltración de Kostiakov y Lewis-Kostiakov, Córdoba, Argentina 115
Juan Francisco Weber
Laureana Apestegui

El abasto de agua por pipa en el valle de Texcoco, México 133
Monserrat Iliana Gómez-Valdez
Jacinta Palerm-Viqueira

Gestión del riego enfocada a variabilidad climática en el cultivo de papa: aplicación al Distrito de Riego 075, Río Fuerte, Sinaloa, México 149
Ernesto Sifuentes
Jaime Macías
Waldo Ojeda
Víctor M. González
Daniel A. Salinas
José G. Quintana

Discusión 169
Guía para colaboradores 171

Contents

Technical articles

Sustainable Crop Irrigation and Overexploitation of Aquifers 5
Oscar Luis Palacios-Vélez
Bernardo Samuel Escobar-Villagrán

Rural Drinking Water Systems. Institutions, Organizations, Government, Administration and Legitimacy 17
Emmanuel Galindo
Jacinta Palerm

Variability in the Water Footprint of Cereal Crops, Cachapoal River, Chile 35
Vanessa Novoa
Octavio Rojas
José Luis Arumí
Claudia Ulloa
Roberto Urrutia
Anny Rudolph

Virtual Water in an Input-Output Framework for the Valley of Mexico Basin 51
Lilia Rodríguez-Tapia
Jorge A. Morales-Novelo
Fabiola S. Sosa-Rodríguez
Juan Carlos Altamirano-Cabrera
Francisco Torres-Ayala

Assessment of Sustainability in Semiarid Mediterranean Basins: Case Study of the Segura Basin, Spain 67
Javier Senent-Aparicio
Julio Pérez-Sánchez
Alicia María Bielsa-Artero

Methodology to Delimit and Characterize Wetlands at Scales of 1:50 000 and 1:20 000 85
Jorge Brena
Cervando Castillo
Ana Wagner

Flood Risk Modeling for the State of Tabasco, 1961-2007 99
Ana Laura Reyes-Olvera
Eduardo Gutiérrez-González

Relation between the Parameters of the Kostiakov and Lewis-Kostiakov Infiltration Models, Cordoba, Argentina 115
Juan Francisco Weber
Laureana Apestegui

Water Supplied by Truck in the Valley of Texcoco, Mexico 133
Monserrat Iliana Gómez-Valdez
Jacinta Palerm-Viqueira

Irrigation Management for Potato Crops Based on Climate Variability: Application in Irrigation District 075, Fuerte River, Sinaloa, Mexico 149
Ernesto Sifuentes
Jaime Macías
Waldo Ojeda
Víctor M. González
Daniel A. Salinas
José G. Quintana

Discussion 169
Contributor's guide 171

IMTA
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

http://www.imta.gob.mx/tyca