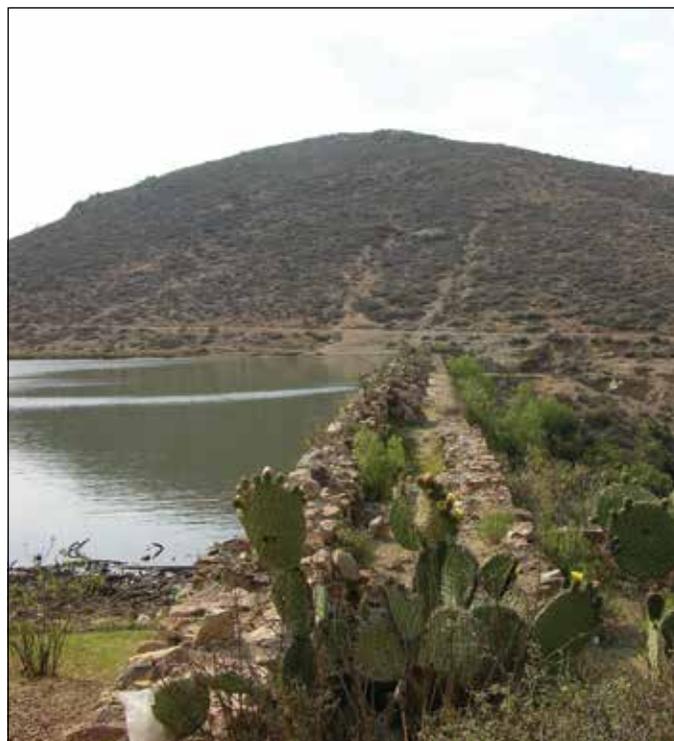


**Portada:** presa de Gil, Morelos, Zacatecas, México. Aunque desde hace ya varias décadas, siguiendo normativas internacionales, y atendiendo necesidades nacionales y contextos locales, los gobiernos y agencias encargadas del manejo del agua han colocado el proceso de tratamiento del agua residual como prioridad y estrategia central para mejorar la calidad de vida, proteger la salud pública y avanzar hacia el desarrollo sostenible, las metas no han podido ser alcanzadas. En México, la cobertura de alcantarillado en 2012 alcanza el 90.5%. El caudal tratado durante la última década se ha incrementado a nivel nacional a más de 100%, al pasar de 64.5 m<sup>3</sup>/s en 2004 a 105.9 m<sup>3</sup>/s en 2013, con 2 287 plantas municipales. No obstante, las aguas no tratadas aún representan el 49.8% del total, esto da cuenta de los enormes rezagos que subsisten en el país. Ver el artículo “Avances y limitantes en el tratamiento del agua residual del estado de Zacatecas” de Patricia Rivera, Refugio Chávez y Fabiola Rivera Salinas (pp. 113-123). DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-08.

**Foto:** Thomas Hillerkuss, colección particular.





Captación de agua en la bahía Todos Santos, Ensenada, B.C., México.

Foto: Alvaro Alberto López Lambrano.



## Contenido

### Artículos

Análisis regional para estimar precipitaciones de diseño en la república mexicana

Ramón Domínguez  
Eliseo Carrizosa  
Guadalupe E. Fuentes  
Maritza L. Arganis  
Javier Osnaya  
Andrés E. Galván-Torres

Evaluation of water use efficiency in irrigated agriculture supported by satellite images

Enrique Palacios-Vélez  
Luis A. Palacios-Sánchez  
José L. Espinosa-Espinosa

Variaciones espacio-temporales y modelaje de la concentración de oxígeno disuelto en el lago de Chapala, México acciones espacio-temporales y modelaje de la concentración de oxígeno disuelto en el lago de Chapala, México

Celia de-la-Mora-Orozco  
José Germán Flores-Garnica  
Hugo Ernesto Flores-López  
Héctor Osbaldo Rubio-Arias  
Álvaro Agustín Chávez-Durán  
Jesús Manuel Ochoa-Rivero  
Javier García-Velasco

Estudio de la calidad bacteriológica y parámetros fisicoquímicos del agua del Distrito de Riego 023

Nami Morales-Durán  
Anaí de la Torre-González  
Víctor García-Sánchez  
Carlos Chávez

Evaluación del potencial hidroenergético a pequeña escala en cuencas hidrológicas con un modelo lluvia-escurrecimiento

Bertha Meza-Prieto  
Javier Aparicio

Modelación bidimensional de la infiltración del agua en surcos aplicando el gradiente conjugado

Carlos Chávez  
Carlos Mota  
Carlos Fuentes  
Antonio Quevedo

Modelling a hydrologic Black-Box

Juan M. Stella  
Glenn S. Warner



## Contents

### Articles

*Regional analysis in approaching design rainfall in Mexican Republic* 5

Ramón Domínguez  
Eliseo Carrizosa  
Guadalupe E. Fuentes  
Maritza L. Arganis  
Javier Osnaya  
Andrés E. Galván-Torres

*Evaluación de la eficiencia del uso del agua en la agricultura apoyada por imágenes satélites* 31

Enrique Palacios-Vélez  
Luis A. Palacios-Sánchez  
José L. Espinosa-Espinosa

*Spatial and temporal variations and modelling of dissolved oxygen concentration in Chapala Lake, Mexico* 39

Celia de-la-Mora-Orozco  
José Germán Flores-Garnica  
Hugo Ernesto Flores-López  
Héctor Osbaldo Rubio-Arias  
Álvaro Agustín Chávez-Durán  
Jesús Manuel Ochoa-Rivero  
Javier García-Velasco

*Study of the bacteriological quality and physiochemical parameters of water from the Irrigation District 023* 53

Nami Morales-Durán  
Anaí de la Torre-González  
Víctor García-Sánchez  
Carlos Chávez

*Evaluation of small-scale hydropower potential in watersheds using a rainfall-runoff model* 69

Bertha Meza-Prieto  
Javier Aparicio

*Modeling two-dimensional infiltration of furrow applying the conjugate gradient* 89

Carlos Chávez  
Carlos Mota  
Carlos Fuentes  
Antonio Quevedo

*Modelando una caja-negra aplicada a la hidrología* 101

Juan M. Stella  
Glenn S. Warner

## Notas

Avances y limitantes en el tratamiento del agua residual del estado de Zacatecas

Patricia Rivera  
Refugio Chávez  
Fabiola Rivera Salinas

Quantitative analysis of internal wave detection variability in the Northern Gulf of California using Synthetic Aperture Radar

Diego Gámez  
Bernardo Shirasago  
Edgar Pérez

Detección de Sequías meteorológicas anuales en el estado de Zacatecas, México, con base en índices de anomalía estandarizada

Daniel Francisco Campos-Aranda

Discusión

Guía para colaboradores

## Notes

*Advances and limitations in the treatment of wastewater in the state of Zacatecas* 113

Patricia Rivera  
Refugio Chávez  
Fabiola Rivera Salinas

*Análisis cuantitativo de la variabilidad en la detección de ondas internas en el norte del Golfo de California, usando el radar de apertura sintética* 125

Diego Gámez  
Bernardo Shirasago  
Edgar Pérez

*Detection of annual meteorological Droughts in the state of Zacatecas, Mexico, based on standardized anomaly indices* 135

Daniel Francisco Campos-Aranda

*Discussion* 151

*Contributor's guide* 153

# Análisis regional para estimar precipitaciones de diseño en la república mexicana

• Ramón Domínguez • Eliseo Carrizosa • Guadalupe E. Fuentes •  
• Maritza L. Arganis\* • Javier Osnaya • Andrés E. Galván-Torres •  
*Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México*

\*Autor para correspondencia

DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-01

## Resumen

Domínguez, R., Carrizosa, E., Fuentes, G. E., Arganis, M. L., Osnaya, J., & Galván-Torres, A. E. (enero-febrero, 2018). Análisis regional para estimar precipitaciones de diseño en la república mexicana. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(1), 5-29. DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-01.

En este artículo se presenta un análisis regional de las lluvias diarias máximas anuales registradas en más de 2 000 estaciones de la república mexicana. Los resultados permiten estimar de manera confiable las tormentas de diseño para cualquier cuenca en México. Para el análisis se agruparon 59 regiones de acuerdo con el relieve del terreno y la forma en la que los fenómenos hidrometeorológicos extremos lo afectan; además, se dividieron las precipitaciones diarias máximas anuales de cada estación entre su promedio respectivo, de manera que en todos los casos la media resulta 1 y la desviación estándar es igual al coeficiente de variación. Para verificar la homogeneidad de cada zona se consideró la prueba de Fisher, pero tomando en cuenta que dicha prueba no es estrictamente aplicable a distribuciones extremas; se planteó además la generación de series sintéticas para validar el comportamiento de los coeficientes de variación de las muestras. Para la estimación de las tormentas de diseño se considera la conformación de hietogramas característicos para duraciones totales menores o mayores que un día.

**Palabras clave:** análisis regional, lluvias diarias máximas anuales, tormenta de diseño, duración, periodo de retorno, conectividad.

## Abstract

Domínguez, R., Carrizosa, E., Fuentes, G. E., Arganis, M. L., Osnaya, J., & Galván-Torres, A. E. (January-February, 2018). Regional analysis in approaching design rainfall in Mexican Republic. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 9(1), 5-29. DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-01.

In this paper, we present a regional analysis of maximum daily rainfall recorded by more than 2 000 rain gauges in the Mexican Republic. The results allow to reliably estimate design storms for any watershed in Mexico. For the analysis we clustered 59 regions based on the terrain morphology and the way they are affected by extreme weather. Additionally the annual maximum daily precipitations were divided by their respective mean, resulting in samples with mean equal to 1 and standard deviation equal to the variation coefficient. To verify the homogeneity for each zone the Fisher test was considered, but taking in to account that such test is not strictly applicable to extreme distributions; it was also proposed to generate synthetic series to validate the variation coefficient behavior of the sample. To estimate the design storms, characteristic hietographs were obtained for total durations higher or lower than one day.

**Keywords:** Regional analysis, daily annual maximum rainfall, design storm, duration, return period, connectivity.

Recibido: 04/11/2016  
Aceptado: 15/04/2017

## Introducción

En México existe información de lluvias diarias medidas en más de 5 000 estaciones; el análisis de estos registros muestra que en muchas estaciones los datos disponibles son escasos, de manera que los análisis estadísticos que se realicen de forma individual no resultan confiables (p. ej., la Comisión

Nacional del Agua, Conagua) utiliza sólo 1 788 estaciones para el cálculo de las normales climatológicas (Conagua, 2015). En el caso de los registros pluviográficos, la situación es peor tanto por lo limitado del número de estaciones como por la calidad y accesibilidad de esa información.

Se han hecho numerosos intentos para estimar lluvias asociadas con distintas duraciones

y periodos de retorno (Conde, Vita, Castro, & López, 2014; SCT, 1990), pero en ellas se efectúa un análisis individual, estación por estación, lo que con frecuencia da lugar a inconsistencias en los resultados.

Son amplios los estudios que se han realizado en los últimos años y en distintos países sobre el análisis regional de frecuencias de precipitaciones, algunos apoyados en la técnica de momentos L (Escalante & Reyes, 2005), además del análisis de componentes principales (Gellens, 2002; St-Hilaire *et al.*, 2003; Wotling, Bouvier, Danloux, & Fritsch, 2000); el uso de técnicas cluster (análisis de racimos) para la agrupación regional técnica estaciones, año; el método de Dalrymple, y análisis de cuantiles y cálculo de fractiles (Dalrymple, 1960; Conleth, 1988, Buishand, 1991; Cunnane, 1988; Gellens, 2002; Yang *et al.*, 2010). Algunos autores proponen utilizar la distribución general de valores extremos (GEV) para el análisis de precipitaciones extremas para distintas duraciones (Rossi, Fiorentino, & Versace, 1984; Gellens, 2002; St-Hilaire *et al.*, 2003). Koutsoyiannis (2009 a y b) indica en su caso de estudio que una función de valores extremos tipo II llega a adecuarse mejor que las funciones Gumbel a registros de precipitación, incluso con pocos datos.

Berndtsson y Niemczynowicz (1988) hicieron una revisión del estado del arte de los distintos factores involucrados en el análisis de precipitaciones; hacen énfasis en las escalas de tiempo y espacio que se deben utilizar, dependiendo del alcance del problema hidrológico; destacan los dos tipos de análisis de precipitación: a nivel puntual, para obtener el periodo de retorno de lluvias con distintas características y el análisis de simultaneidad de las precipitaciones, considerando distintos sitios para hacer estimaciones areales.

En México se han hecho estudios de regionalización de tormentas en la cuenca del Valle de México (Cortés, 2003). Guichard y Domínguez (1998), en su estudio de regionalización de cuencas del Alto Grijalva, consideran diversos estudios sobre los factores de reducción por área, por periodo de retorno y por duración (Bell, 1969; Chen, 1983). Destacan los estudios

de regionalización de precipitaciones usando la distribución general de valores extremos realizados en San Luis Potosí, Sinaloa, México (Campos-Aranda, 2008, 2014). También se han hecho mapas de factores de regionalización en la república mexicana (Mendoza, 2001), además de la estimación regional de factores de convectividad (Baeza, 2007), así como mapas de precipitaciones para distintos periodos de retorno y duraciones (Domínguez *et al.*, 2012; SCT, 1990); la regionalización de precipitaciones con funciones bivariadas y máxima entropía (Escalante-Sandoval & Domínguez, 2001); la influencia de la regionalización en la estimación de precipitaciones máximas diarias (Escalante-Sandoval & Amores-Rovelo, 2014); el cambio climático a escala regional en precipitación y temperatura (Magaña & Galván, 2010).

En este trabajo se hacen análisis regionales a partir de la información de 2 293 pluviómetros, lo que permite estimar precipitaciones de diseño (asociadas con diversos periodos de retorno) para distintas duraciones; se presenta también un procedimiento que utiliza series sintéticas para la validación de las zonas homogéneas mediante la comparación de los coeficientes de variación históricos y sintéticos. Al hacer el análisis regional se logran resultados espacialmente consistentes, evitando las inconsistencias que se obtienen cuando se analiza cada estación de forma individual.

En relación con duraciones menores que un día, se retoman los resultados de Baeza y Mendoza (Baeza, 2007; Mendoza, 2001), quienes usaron la información original recopilada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 1990), así como datos consignados en boletines de la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos (notablemente, los boletines de la Comisión del Papaloapan), pero la manejaron regionalmente utilizando el concepto de “convectividad”, apoyado en la teoría desarrollada por Chen (1983), y considerando la conformación topográfica y climatológica del entorno de cada estación. Los resultados obtenidos permiten estimar hietogramas de diseño para distintos intervalos de tiempo y diversas duraciones totales de la tormenta, utilizando el método de bloques

alternos (Chow, Maidment, & Mays, 1988), para cualquier cuenca de la república.

### Metodología

Se analizaron los datos de un total de 2 293 estaciones de la base de datos *Climate Computing*

*Project (Clicom)* (figura 1). En el cuadro 1 se muestra el número de estaciones consideradas en cada estado, así como el promedio de años de registro correspondiente.

Para la selección de las 2 293 estaciones se verificó que cumplieran con los siguientes requisitos:

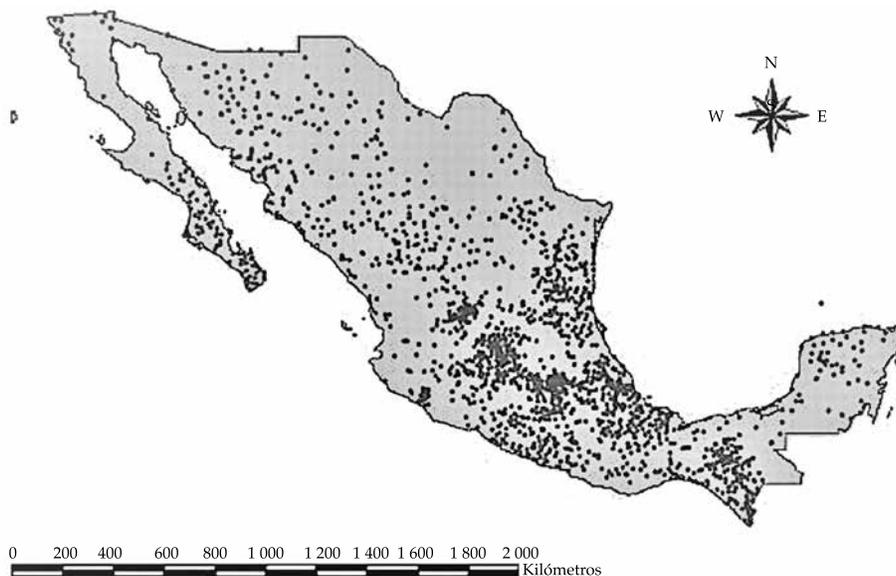


Figura 1. Estaciones procesadas.

Cuadro 1. Estaciones seleccionadas por estado.

Entidad federativa	Número de estaciones al 2010	Promedio de años de registro*	Entidad federativa	Número de estaciones al 2010	Promedio de años de registro*
Aguascalientes	50	35.18	Morelos	44	33.68
Baja California Norte	37	32.68	Nayarit	25	30.32
Baja California Sur	72	33.03	Nuevo León	55	31.27
Campeche	42	32.64	Oaxaca	129	29.93
Chiapas	109	33.55	Puebla	98	38.56
Chihuahua	58	30.84	Querétaro	34	32.24
Coahuila	28	33.76	Quintana Roo	20	30.8
Colima	17	46.76	San Luis	103	32.23
Ciudad de México	30	28.9	Sinaloa	51	31.1
Durango	83	42.39	Sonora	79	32.75
Estado de México	114	27.7	Tabasco	42	35.79
Guanajuato	108	37.86	Tamaulipas	109	30.28
Guerrero	125	39.75	Tlaxcala	20	32.6
Hidalgo	66	44.2	Veracruz	190	31.1
Jalisco	180	39.74	Yucatán	30	29.97
Michoacán	93	34.37	Zacatecas	51	30.08
			<b>Total</b>	<b>2 293</b>	<b>33.94</b>

- Estaciones operando por al menos 20 años y con la información completa en ese periodo de registro.
- En el caso de las zonas centro y sur del país se incluyeron estaciones en las que los datos faltantes correspondieran a la temporada de estiaje. En el noroeste, por la presencia de lluvias intensas en época invernal, sólo se incluyeron estaciones con registro completo.

Para cada una de las estaciones se obtuvieron los valores diarios máximos anuales y se calcularon los estadísticos: media, desviación estándar, coeficiente de variación (CV), además del valor máximo y valor mínimo. El análisis de estos estadísticos permitió hacer una depuración de los valores que en primera instancia parecieron ilógicos (por un lado valores muy pequeños o inclusive cero de las máximas precipitaciones en todo un año y por otro valores muy grandes, del orden de cuatro veces la media). En el caso de los valores muy grandes, se consultaron las hojas de registro originales, con ayuda de la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR); de acuerdo con los resultados de esa consulta se eliminaron los incorrectos.

Con los valores depurados y tomando en cuenta tanto los coeficientes de variación como la conformación topográfica, se definieron regiones homogéneas desde el punto de vista de las precipitaciones diarias máximas anuales, considerando que si en una región los coeficientes de variación son similares y los valores máximos anuales de cada estación se modulan dividiéndolos entre su media, las muestras moduladas tendrán media igual a 1 y una desviación estándar similar. Para comprobar la hipótesis de homogeneidad entre las muestras así obtenidas se utiliza tradicionalmente la prueba de Fisher (Domínguez *et al.*, 2014), pero considerando que los valores máximos no corresponden a una distribución de probabilidades normal, en este trabajo se propone un nuevo procedimiento para verificar la hipótesis de que las muestras históricas provienen de una población caracterizada por la función de distribución ajustada a la muestra ampliada. Para ello se generan series

sintéticas y se calculan los CV de un conjunto de muestras, del tamaño de las históricas, obtenidas a partir de la función de distribución ajustada. La región es considerada homogénea si el rango de los CV simulados incluye al conjunto de los CV históricos (Domínguez-Mora, Bouvier, Neppel, & Niel, 2005).

Las muestras homogéneas obtenidas para cada región estarán entonces conformadas por mucho más valores que los correspondientes a cada estación considerada individualmente, de manera que los resultados obtenidos al ajustarles una función de distribución de probabilidades serán mucho más confiables y robustos.

## Relaciones precipitación-duración-periodo de retorno

### Estimaciones para duraciones de tormenta menores que una hora

La estimación de gastos de diseño para cuencas pequeñas o medianas requiere conocer las precipitaciones medias asociadas con duraciones menores que un día, es decir, obtener las curvas precipitación-duración-periodo de retorno.

Chen (1983) realizó estudios sobre las precipitaciones para diferentes periodos de retorno apoyado en los estudios generados por USBW en el Paper No. 40 (TP 40), y obtuvo una fórmula generalizada de intensidad-duración-periodo de retorno para cualquier localidad en EUA. De acuerdo con el estudio de Chen, se requiere obtener la altura de lluvia para un periodo de retorno de 10 años tanto para una hora ( $P_1^{10}$ ) como para 24 horas ( $P_{24}^{10}$ ); para un periodo de retorno de 100 años, la altura de lluvia para una hora ( $P_1^{100}$ ). Con estos datos se obtienen los cocientes  $R = (P_1^T/P_{24}^T)$  y  $X = (P_1^{10}/P_1^{100})$ . Además encontró que el cociente  $R$  que relaciona la relación de altura de lluvia con la duración varía entre un 10 y 60% con la ubicación geográfica y que probablemente es independiente del periodo de retorno; que la razón  $X$  de altura de lluvia con la frecuencia parece ser independiente de la duración y varía entre los rangos de 1.33 y 1.63. Estas relaciones

se usaron para la construcción de la ecuación (1), con la cual se puede calcular la precipitación para cualquier duración y periodo de retorno:

$$P_t^T = \frac{aP_1^{10} \log(10^{2-x} T^{x-1})}{(t+b)^c} \left(\frac{t}{60}\right) \quad (1)$$

válida para  $T \geq 1$  año y  $5 \text{ min} \leq t \leq 24 \text{ h}$ , donde  $P_t^T$  precipitación, en milímetros, para una duración  $t$  en minutos y un periodo de retorno  $T$  en años,  $X = P_1^{100}/P_1^{10}$ ,  $a$ ,  $b$  y  $c$  parámetros de la tormenta que se determinan según el factor  $R = P_1^T/P_{24}^T$ .

Baeza (2007) toma en cuenta que en México existe información pluviométrica suficiente como para estimar las precipitaciones asociadas con una duración de 24 h y cualquier periodo de retorno con mayor precisión que la que se obtiene usando la relación  $X = P_1^{100}/P_1^{10}$  que propone Chen. Se concentra entonces en el análisis para la república mexicana del factor  $R = P_1^T/P_{24}^T$  al que denomina "factor de convectividad", que, por el contrario, es difícil de estimar con buena precisión dada la escasez de datos pluviográficos disponibles en México. Para ello utiliza la información original recopilada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 1990), así como datos consignados en boletines de la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos (notablemente, los boletines de la Comisión del Papaloapan), pero la maneja regionalmente utilizando el concepto de "convectividad", al considerar la conformación topográfica del entorno de cada estación y su relación con los fenómenos meteorológicos predominantes en cada zona.

#### *Estimaciones para duraciones mayores que un día*

Adicionalmente, y trabajando con las mismas regiones, se obtienen máximos anuales promedio para duraciones de 2, 3, ..., 30 días y su relación con las de un día, para cada una de las 2 293 estaciones estudiadas. Al promediar estas relaciones dentro de cada región se determinan factores que permiten una estimación confiable de las precipitaciones medias asociadas con

duraciones de hasta 30 días a partir de las obtenidas para un día.

## Resultados

### *Captura y depuración de la información*

Se revisaron estaciones con por lo menos 20 años de registros completos. En el cuadro 1 se indica el número de estaciones seleccionadas, así como el número promedio de años de registro para cada estado de la república. En el cuadro 2 se muestra, a manera de ejemplo, el caso de Durango; se marcaron con azul los valores que parecieron extremadamente grandes y con rojo los que fueron eliminados cuando se pudo verificar en el registro original, proporcionado por la GASIR, que efectivamente se trata de errores de captura; adicionalmente se muestran, marcados con amarillo, los valores mínimos que parecieron ilógicos (típicamente valores nulos o de sólo unos cuantos milímetros en zonas lluviosas).

### *Conformación de regiones homogéneas*

Considerando, por un lado, los coeficientes de variación de los valores máximos anuales, pero por otro la cercanía entre los sitios de medición, las características de la topografía en el entorno de dichos sitios y el tipo de fenómeno meteorológico que provoca las precipitaciones extremas, se buscó un compromiso entre definir regiones con muchas estaciones, a fin de que la muestra que se obtiene al suponer que provienen de la misma población resulte muy grande y por lo tanto las extrapolaciones a periodos de retorno grandes fueran más confiables, y limitar el tamaño de cada región, con lo que se tendría más confianza en la aceptación de la hipótesis de homogeneidad. Se definieron así las 59 regiones que se muestran en la figura 2. Asimismo, en el cuadro 3 se muestran los coeficientes de variación máximo y mínimo, al igual que el número de estaciones incluidas en cada región. Se hace notar que en sólo cinco casos se tienen coeficientes de variación mayores que 1 y en seis menores que 0.2.

Cuadro 2. Tabla con correcciones Durango.

Año	Estación													
	10001	10002	10003	10004	10012	10014	10016	10018	10020	10021	10028	10029	10030	10033
1975	25	40	81	20	38	48		45	17	57	70		53	77
1976	35.5	60	136.8	20		48		144	42	32	53		54	25.5
1977		40	125	21.1	52.2	40		138		40	33			45
1978	40	62	88	28.8	28.5	36		84	53	60.3	31		33	32
1979	11.4		170	37	55	89		206	40	43	35			20.5
1980	8.9	45	50	37.5	57	43	35.5	106	46	47	38			28
1981	30		54.2	27	39	65	40.8	57	20	32.5	70		60	
1982	31.7	45	70	32	75.1		31.6		34	34.5	34		62.5	
1983	75	48	105	26.2	82.5		44.8	117	24	36	56.5		53	
1996		38		66	75.4		50		21	33.5	56	35		
1997	28	30	97	86.5	41.5		280	89	33	71.5	24		20	
1998	37.5	34		40.4	57.3				29	41.5	40		32.4	
2001	25	26		28.5			14		34	34.2	22.5		28.1	
2002	65			32.8	33		28	40	86	17.8	56	46	31.4	
2003	60			35	55.7			40	43	71.9	60	32	42.1	
2004	72		152	57.5			21	70	75.5	77.3	34.5		36.1	
2005	52.5		68.7	54.8	45.4		29.5	60	74	22.9	50.5		20.4	
2006	40		53	29.5	61.5		22			64	50	48	36.8	
2007			71.2					50		40	50		52.5	
2008			59.2		49.4			60	52		37.5	40		
2009			60	32.5				60						
2010	30		81					60						
Media	40.234	48.135	88.314	37.414	48.019	52.655	40.679	93.649	40.097	42.979	45.125	40.784	44.270	54.979
Desv. est.	15.505	20.627	35.420	15.520	14.359	18.617	43.523	42.510	18.140	15.359	16.327	11.247	18.327	48.342
Coef. var	0.385	0.429	0.401	0.415	0.299	0.354	1.070	0.454	0.452	0.357	0.362	0.276	0.414	0.879
Máximo	75	137	189.5	86.5	82.5	89	280	206	86	84.6	111	84.3	98	250
Mínimo	8.9	25	47	20	15	20.6	14	40	15.5	17.8	22	20	20	15
Años de registro	29	37	35	43	53	29	34	45	36	66	60	61	33	38

### *Funciones de distribución de las muestras regionales*

Los valores máximos anuales de precipitación diaria de cada estación se modularon dividiéndolos entre su media, de tal manera que, al agruparlos, se obtuvieron muestras con un gran número de elementos para cada una de las 59 regiones. A cada una de las 59 muestras ampliadas se les ajustaron funciones de distribución

de probabilidades de tipo Gumbel (G) y Doble Gumbel (DG), que dieron los menores errores estándar de ajuste; con ellas se estimaron los valores asociados con distintos periodos de retorno, como se muestra a manera de ejemplo en la figura 3. En el cuadro 4 se muestran los resultados obtenidos para las 59 regiones con las distribuciones de probabilidad de mejor ajuste. Adicionalmente, se puede obtener el valor de la precipitación media anual para cualquier sitio

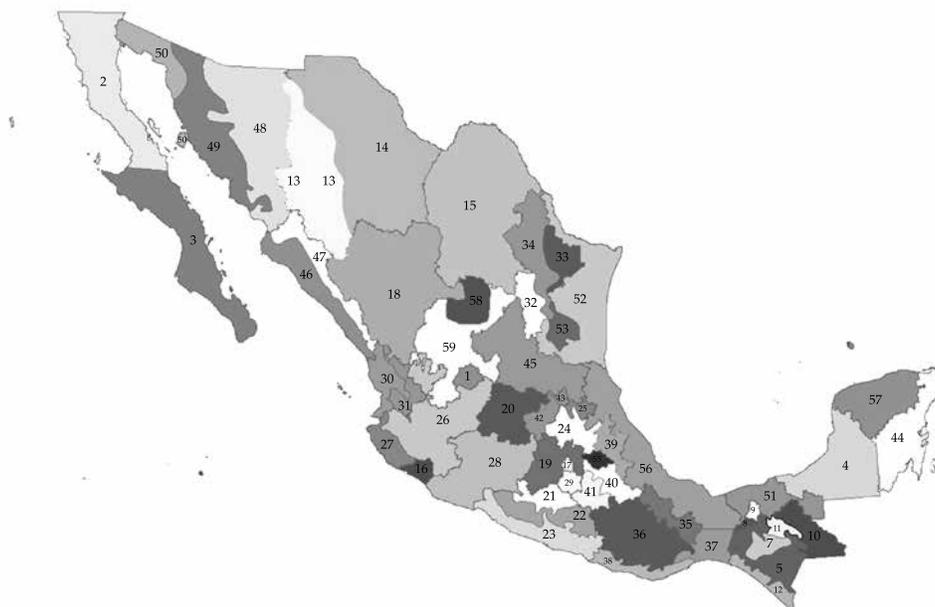


Figura 2. Cincuenta y nueve (59) regiones definidas tomando en cuenta coeficientes de variación y condiciones topográficas y meteorológicas. Fuente: Domínguez et al., 2007. Proyecto Cenapred.

Cuadro 3. Número de estaciones y coeficientes de variación extremos en cada región.

Entidad federativa	Región	Núm. de estaciones	Coefficiente de variación máximo	Coefficiente de variación mínimo
Aguascalientes	Aguascalientes	50	0.46	0.24
Baja California Norte	Baja California Norte	37	1.31	0.41
Baja California Sur	Baja California Sur	72	1.36	0.46
Campeche	Campeche	42	0.93	0.26
Chiapas	Angostura	36	0.88	0.22
	Malpaso	17	0.66	0.24
	Chicoasén	21	0.79	0.22
	Peñitas	4	0.51	0.26
	Almandro	11	0.82	0.24
	Pichucalco	3	0.35	0.29
	Teapa	3	0.50	0.23
Chiuhuahua	Costa	28	0.57	0.23
	Bajos	18	0.43	0.22
Coahuila	Restantes	40	0.96	0.24
	Coahuila	28	1.04	0.31
Colima	Colima	17	0.68	0.39
Ciudad de México	Ciudad de México	30	0.50	0.21
Durango	Durango	83	1.07	0.23
Estado de México	Estado de México	114	0.50	0.20
Guanajuato	Guanajuato	108	0.49	0.22
Guerrero	Norte	36	0.48	0.18
	Centro	56	0.68	0.32
	Costa	37	0.61	0.21
Hidalgo	Menores	57	0.70	0.22
	Mayores	5	0.52	0.43

Cuadro 3 (continuación). Número de estaciones y coeficientes de variación extremos en cada región.

Entidad federativa	Región	Núm. de estaciones	Coefficiente de variación máximo	Coefficiente de variación mínimo
Jalisco	Interior	153	0.53	0.20
	Costa	23	0.58	0.30
Michoacán	Michoacán	93	0.65	0.18
Morelos	Morelos	44	0.64	0.20
Nayarit	Costa	14	0.40	0.25
	Sierra	11	0.33	0.19
Nuevo León	I	10	0.93	0.29
	II	7	0.63	0.39
	III	38	1.01	0.38
Oaxaca	Golfo	29	0.53	0.26
	Altiplano	82	0.74	0.18
	Istmo	14	0.56	0.37
	Pacífico	4	0.59	0.43
Puebla	Norte	49	0.79	0.26
	Centro	34	0.67	0.21
	Sur	14	0.52	0.19
Querétaro	Zona Alta	7	0.49	0.26
	Zona Baja	27	0.64	0.24
Quintana Roo	Quintana Roo	20	0.64	0.28
San Luis Potosí	San Luis Potosí	103	0.94	0.27
Sinaloa	Zona I	21	0.77	0.39
	Zona II	30	0.62	0.20
Sonora	Zona I	57	0.85	0.17
	Zona II	21	0.77	0.33
	Zona III	2	0.77	0.77
Tabasco	Tabasco	32	0.53	0.24
Tamaulipas	Zona I	81	0.87	0.27
	Zona II	20	0.91	0.35
	Zona III	8	0.51	0.31
Tlaxcala	Tlaxcala	22	0.44	0.22
Veracruz	Veracruz	190	0.79	0.20
Yucatán	Yucatán	30	0.68	0.30
Zacatecas	Zona I	11	0.54	0.28
	Zona II	39	0.45	0.22
	<b>Total</b>	<b>2 293</b>		

de la república, con un mapa de la distribución de las medias de las precipitaciones máximas anuales (como el de la figura 4) y multiplicándolo por los factores por periodo de retorno correspondientes a la región en la que se encuentre el sitio de estudio, estimar la precipitación diaria asociada a cualquier periodo de retorno.

#### *Estimaciones para duraciones de tormenta menores que una hora*

En la figura 5 se muestra el mapa de los factores de convectividad estimados por Baeza (2007). Para obtener la precipitación asociada con una duración de una hora sólo se multiplica la

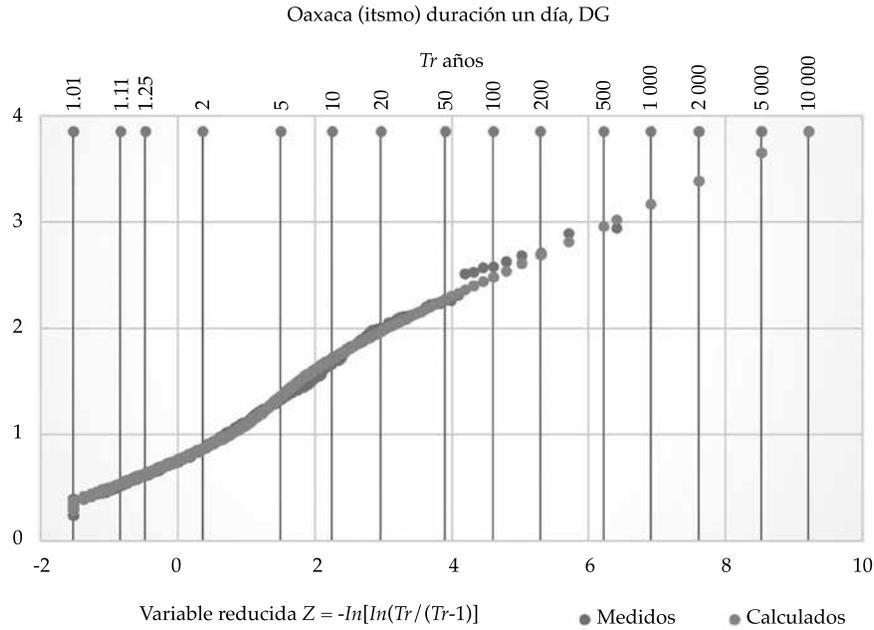


Figura 3. Función de distribución ajustada a los máximos anuales normalizados de la región Oaxaca Itsmo.

Cuadro 4. Factores por periodo de retorno para las 59 regiones.

Entidad Federativa	Región homogénea	Región	Factores de regionalización											
			TR años											
			2	5	10	20	50	100	200	500	1 000	2 000	5 000	10 000
Aguascalientes	1	Aguascalientes	0.94	1.25	1.45	1.64	1.90	2.08	2.27	2.52	2.71	2.89	3.14	3.33
	2	Baja California Norte	0.84	1.36	1.81	2.23	2.73	3.09	3.45	3.91	4.27	4.62	5.09	5.43
Baja California Sur	3	Baja California Sur	0.77	1.36	2.03	2.65	3.38	3.90	4.41	5.08	5.57	6.07	6.72	7.21
Campeche	4	Campeche	0.86	1.24	1.64	2.04	2.51	2.85	3.19	3.62	3.95	4.27	4.69	5.01
Chiapas	5	Angostura	0.90	1.19	1.46	1.81	2.29	2.65	3.00	3.46	3.81	4.15	4.61	4.95
	6	Malpaso	0.90	1.22	1.50	1.80	2.20	2.49	2.77	3.15	3.44	3.72	4.10	4.36
	7	Chicoasén	0.93	1.21	1.44	1.68	1.99	2.22	2.46	2.76	2.99	3.23	3.53	3.76
	8	Peñitas	0.91	1.22	1.50	1.79	2.18	2.47	2.76	3.13	3.41	3.69	4.07	4.35
	9	Almandro	0.89	1.22	1.53	1.89	2.36	2.70	3.03	3.47	3.80	4.13	4.55	4.90
	10	Pichucalco	0.95	1.24	1.44	1.63	1.87	2.05	2.23	2.47	2.66	2.84	3.08	3.26
	11	Teapa	0.94	1.25	1.46	1.66	1.91	2.10	2.29	2.54	2.73	2.92	3.17	3.36
Chihuahua	12	Costa	0.91	1.20	1.48	1.81	2.19	2.46	2.72	3.05	3.30	3.55	3.88	4.13
	13	Bajos	0.90	1.43	1.78	2.11	2.54	2.87	3.19	3.62	3.94	4.26	4.69	5.01
	14	Restantes	0.89	1.25	1.56	1.89	2.34	2.68	3.02	3.46	3.79	4.12	4.55	4.87
Coahuila	15	Coahuila	0.85	1.28	1.68	2.09	2.60	2.98	3.34	3.82	4.19	4.55	5.03	5.41
Colima	16	Colima	0.85	1.26	1.69	2.10	2.58	2.93	3.27	3.71	4.05	4.38	4.82	5.15
Ciudad de México	17	Ciudad de México	0.95	1.21	1.39	1.55	1.77	1.93	2.09	2.30	2.46	2.62	2.83	3.00
Durango	18	Durango	0.91	1.25	1.52	1.80	2.16	2.43	2.70	3.05	3.32	3.58	3.93	4.21
Estado de México	19	Estado de México	0.95	1.21	1.38	1.55	1.76	1.93	2.09	2.30	2.46	2.62	2.83	2.99
Guanajuato	20	Guanajuato	0.95	1.23	1.42	1.60	1.83	2.00	2.17	2.40	2.57	2.75	2.98	3.15

Cuadro 4 (continuación). Factores por periodo de retorno para las 59 regiones.

Guerrero	21	Norte	0.95	1.21	1.38	1.54	1.75	1.91	2.07	2.27	2.43	2.59	2.79	2.95
	22	Centro	0.92	1.34	1.62	1.89	2.24	2.50	2.76	3.10	3.36	3.62	3.96	4.21
	23	Costa	0.90	1.24	1.52	1.80	2.15	2.40	2.65	2.99	3.24	3.49	3.82	4.07
Hidalgo	24	Menores	0.92	1.35	1.63	1.90	2.25	2.51	2.78	3.12	3.38	3.64	3.99	4.25
	25	Mayores	0.87	1.35	1.71	1.98	2.30	2.53	2.76	3.06	3.28	3.50	3.80	4.01
Jalisco	26	Interior	0.92	1.24	1.45	1.64	1.86	2.03	2.19	2.41	2.57	2.74	2.95	3.12
	27	Costa	0.93	1.30	1.55	1.79	2.09	2.32	2.55	2.85	3.08	3.31	3.61	3.84
Michoacán	28	Michoacán	0.92	1.21	1.45	1.69	1.98	2.20	2.42	2.70	2.92	3.14	3.42	3.64
Morelos	29	Morelos	0.95	1.21	1.39	1.56	1.77	1.93	2.10	2.31	2.47	2.63	2.84	3.01
Nayarit	30	Costa	0.95	1.22	1.40	1.58	1.80	1.97	2.13	2.36	2.52	2.69	2.91	3.08
	31	Sierra	0.95	1.20	1.37	1.53	1.73	1.88	2.04	2.24	2.39	2.54	2.74	2.90
Nuevo León	32	I	0.88	1.26	1.61	1.99	2.51	2.89	3.26	3.75	4.12	4.49	4.97	5.34
	33	II	0.91	1.38	1.69	1.99	2.38	2.67	2.96	3.34	3.63	3.92	4.30	4.59
	34	III	0.82	1.28	1.77	2.30	2.94	3.40	3.85	4.44	4.89	5.33	5.91	6.37
Oaxaca	35	Golfo	0.94	1.24	1.44	1.63	1.87	2.06	2.24	2.48	2.66	2.84	3.08	3.27
	36	Altiplano	0.91	1.22	1.46	1.76	2.2	2.53	2.86	3.28	3.6	3.92	4.33	4.64
	37	Istmo	0.87	1.36	1.72	1.97	2.27	2.48	2.69	2.96	3.17	3.38	3.65	3.85
	38	Pacífico	0.86	1.25	1.67	2.10	2.61	2.98	3.33	3.80	4.15	4.50	4.96	5.33
Puebla	39	Norte	0.93	1.32	1.57	1.82	2.14	2.38	2.61	2.93	3.16	3.40	3.72	3.95
	40	Centro	0.94	1.27	1.49	1.71	1.98	2.19	2.40	2.67	2.87	3.08	3.35	3.55
	41	Sur	0.94	1.26	1.47	1.67	1.92	2.12	2.31	2.57	2.76	2.95	3.21	3.40
Querétaro	42	Zona Alta	0.93	1.29	1.53	1.75	2.04	2.26	2.48	2.77	2.99	3.21	3.49	3.71
	43	Zona Baja	0.94	1.27	1.49	1.70	1.98	2.18	2.38	2.65	2.86	3.06	3.33	3.53
Quintana Roo	44	Quintana Roo	0.88	1.26	1.60	1.91	2.28	2.55	2.82	3.17	3.44	3.70	4.05	4.32
San Luis	45	San Luis	0.88	1.29	1.63	1.94	2.33	2.61	2.89	3.25	3.52	3.80	4.16	4.44
Sinaloa	46	Zona I	0.84	1.28	1.76	2.15	2.61	2.93	3.25	3.67	3.98	4.29	4.70	5.01
	47	Zona II	0.94	1.27	1.49	1.70	1.97	2.18	2.38	2.65	2.85	3.06	3.33	3.53
Sonora	48	Zona I	0.93	1.29	1.53	1.75	2.05	2.27	2.49	2.78	3.00	3.22	3.50	3.72
	49	Zona II	0.88	1.26	1.61	1.96	2.38	2.69	3.00	3.40	3.70	4.00	4.41	4.71
	50	Zona III	0.77	1.50	2.23	2.77	3.38	3.82	4.25	4.82	5.24	5.67	6.22	6.64
Tabasco	51	Tabasco	0.94	1.26	1.47	1.67	1.94	2.13	2.33	2.59	2.78	2.98	3.23	3.43
Tamaulipas	52	Zona I	0.89	1.31	1.61	1.88	2.20	2.43	2.66	2.96	3.19	3.42	3.72	3.95
	53	Zona II	0.85	1.26	1.69	2.18	2.81	3.26	3.70	4.27	4.71	5.14	5.72	6.12
	54	Zona III	0.91	1.32	1.59	1.82	2.09	2.29	2.49	2.75	2.94	3.14	3.39	3.59
Tlaxcala	55	Tlaxcala	0.95	1.22	1.40	1.57	1.79	1.96	2.13	2.35	2.51	2.68	2.90	3.06
Veracruz	56	Veracruz	0.90	1.27	1.56	1.83	2.15	2.39	2.62	2.93	3.16	3.39	3.69	3.93
Yucatán	57	Yucatán	0.93	1.32	1.59	1.84	2.17	2.41	2.66	2.98	3.22	3.47	3.79	4.03
Zacatecas	58	Zona I	0.92	1.34	1.62	1.88	2.23	2.48	2.74	3.08	3.33	3.59	3.92	4.18
	59	Zona II	0.95	1.23	1.42	1.60	1.84	2.02	2.19	2.42	2.60	2.77	3.00	3.18

obtenida para un día por el factor que corresponda. Adicionalmente, y de acuerdo con los resultados obtenidos por Chen (1983), para estimar los valores asociados con otras duraciones menores que 24 horas, se multiplican los de 1 h por los factores que se indican en el cuadro 5.

### Estimaciones para duraciones mayores que un día

Cuando los estudios se realizan para cuencas grandes o para los ingresos a presas con capacidad de regulación significativa, se requiere

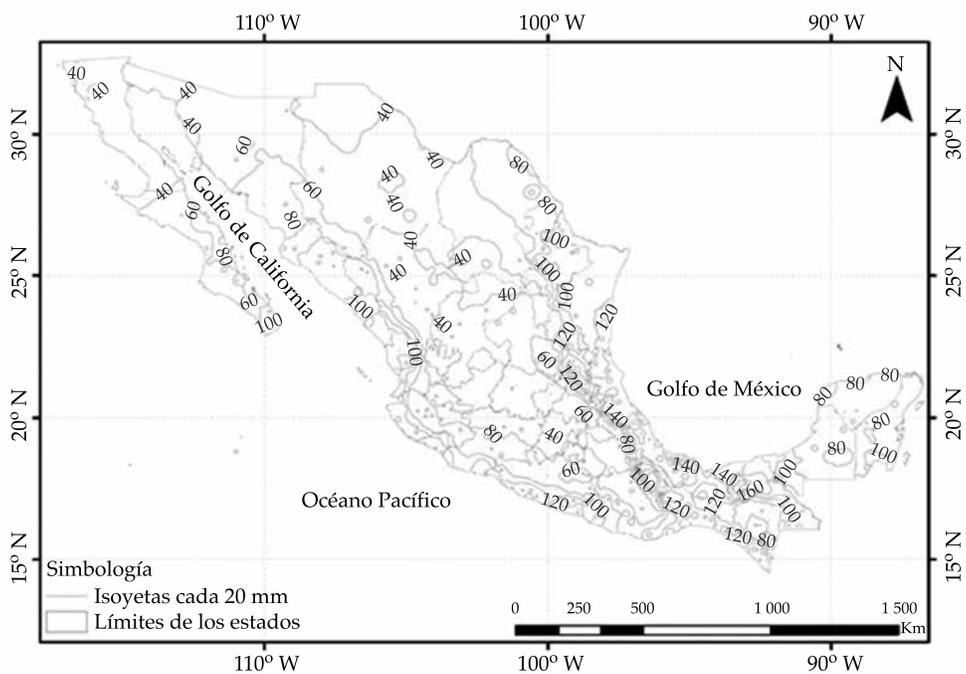


Figura 4. Distribución de las medias de las precipitaciones diarias máximas anuales en la república mexicana.  
Fuente: Domínguez et al., 2007. Proyecto Cenapred.

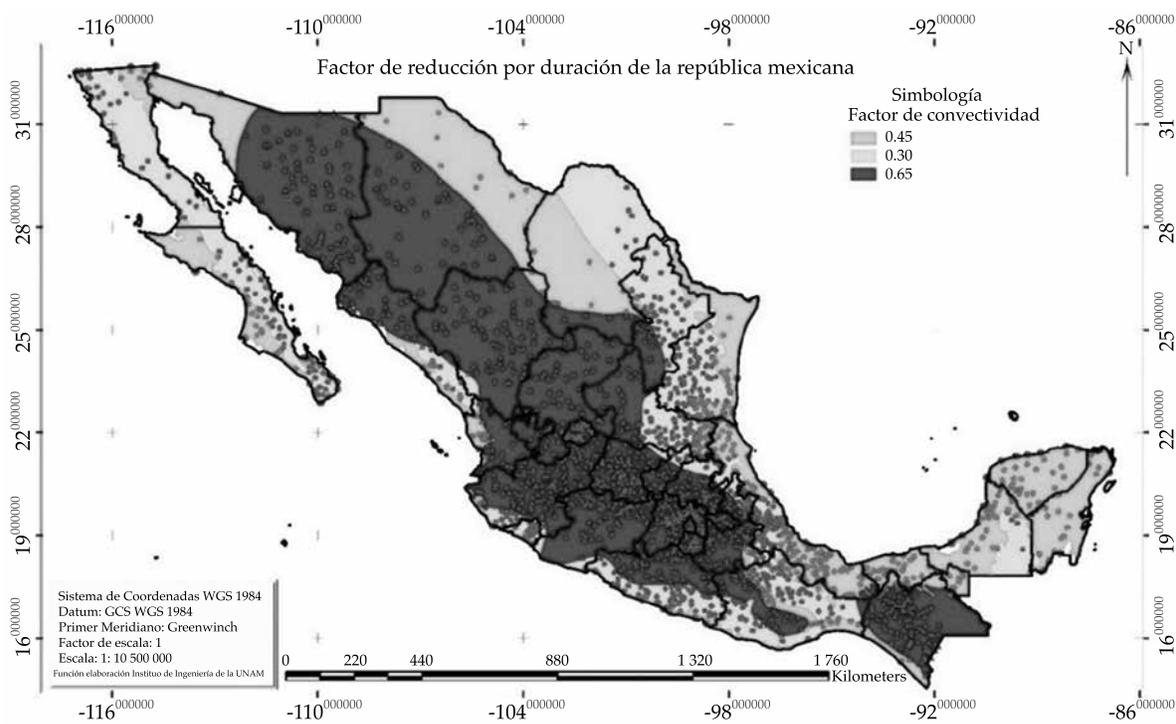


Figura 5. Mapa de factores de conectividad (Baeza, 2007).

Cuadro 5. Factores  $K_d^{(1)}$  en función de  $R$  y la duración  $d$ . Fuente: adaptado de Luna, 2013.

$d$ (min)	$d$ (h)	$R = P_1^T / P_{24}^T$ $K$ en función de $d$ y el factor de convectividad							
		$R = 0.10$	$R = 0.20$	$R = 0.30$	$R = 0.40$	$R = 0.45$	$R = 0.50$	$R = 0.60$	$R = 0.65$
10	0.17	0.293	0.39	0.432	0.454	0.462	0.469	0.481	0.487
15	0.25	0.38	0.485	0.536	0.565	0.575	0.584	0.6	0.608
30	0.5	0.612	0.699	0.745	0.773	0.79	0.793	0.809	0.816
60	1	1	1	1	1	1	1	1	1
90	1.5	1.378	1.248	1.185	1.146	1.13	1.119	1.097	1.088
120	2	1.646	1.424	1.317	1.25	1.22	1.203	1.166	1.151
150	2.5	1.934	1.595	1.435	1.337	1.30	1.268	1.215	1.193
180	3	2.207	1.75	1.538	1.41	1.35	1.322	1.254	1.226
210	3.5	2.468	1.892	1.631	1.475	1.41	1.367	1.286	1.253
240	4	2.719	2.024	1.715	1.532	1.45	1.407	1.314	1.275
270	4.5	2.961	2.148	1.793	1.584	1.508	1.443	1.337	1.294
300	5	3.196	2.266	1.865	1.631	1.547	1.475	1.358	1.311
360	6	3.649	2.485	1.997	1.716	1.616	1.531	1.395	1.339
420	7	4.081	2.686	2.115	1.791	1.676	1.579	1.425	1.362
480	8	4.497	2.874	2.223	1.858	1.73	1.621	1.451	1.382
540	9	4.899	3.05	2.322	1.919	1.778	1.659	1.474	1.399
600	10	5.289	3.216	2.414	1.975	1.822	1.694	1.494	1.415
660	11	5.669	3.375	2.501	2.026	1.862	1.725	1.513	1.429
720	12	6.039	3.527	2.582	2.074	1.9	1.754	1.53	1.441
840	14	6.756	3.812	2.734	2.162	1.968	1.807	1.56	1.463
960	16	7.445	4.078	2.872	2.241	2.029	1.853	1.586	1.482
1080	18	8.112	4.328	2.999	2.313	2.084	1.895	1.609	1.499
1200	20	8.758	4.564	3.117	2.379	2.134	1.933	1.63	1.513
1320	22	9.388	4.789	3.228	2.441	2.18	1.968	1.649	1.527
1440	24	10.001	5.004	3.333	2.498	2.223	2	1.667	1.539

contar con tormentas de diseño de varios días. Por ello, se realizó el análisis de los datos históricos de las precipitaciones medias máximas anuales asociadas con duraciones de 2, 3,... 30 días consecutivos. Para cada estación  $i$  y cada año  $k$  de registro se obtuvo el cociente entre la precipitación máxima promedio correspondiente a cada duración y la correspondiente a un día, es decir:

$$R_{d,i,k} = PMAX_{d,i,k} / PMAX_{1,i,k} \quad (2)$$

donde  $PMAX_{d,i,k}$  es la precipitación media máxima para una duración  $d$ , en días, una estación  $i$  y el año  $k$ .

Al hacer los promedios para todos los años de registro de la estación  $i$  se obtiene:

$$PM_{d,i} = \sum_k (R_{d,i,k}) / NK \quad (3)$$

donde  $NK$  son los años de registro.

En seguida se calcularon, para cada región, los promedios obtenidos al considerar todas las estaciones:

$$PMR_d = \sum_i (PM_{d,i}) / NI \quad (4)$$

donde  $NI$  es el número de estaciones de la región considerada.

Cuadro 6. Relaciones entre las precipitaciones medias máximas asociadas con diferentes duraciones y las correspondientes a un día.

Región	Núm. de valores	2D/1D	8D/1D	Región	Núm. de valores	2D/1D	8D/1D
Chiapas, Pichucalco	3	0.686	0.32	HGOMEN	58	0.667	0.287
Chiapas, Chicoasén	20	0.677	0.325	JALCOST	23	0.669	0.291
Chiapas, Almandro	11	0.693	0.332	JALINT	153	0.67	0.309
Chiapas, Teapa	3	0.69	0.313	MIH000	93	0.668	0.324
Chiapas, Malpaso	17	0.668	0.298	OAXALT	82	0.693	0.33
Chiapas, Angostura	36	0.697	0.341	OAXGOL	29	0.693	0.338
Peñitas	4	0.69	0.299	OAXPAC	4	0.667	0.319
Chiapas Costa	28	0.687	0.329	OAXITS	14	0.687	0.282
Tlaxcala	22	0.673	0.314	PUECEN	34	0.687	0.32
Yucatán	32	0.64	0.258	PUENOR	49	0.699	0.314
Morelos	44	0.681	0.331	PUESUR	14	0.664	0.311
Zacatecas, Zona 01	11	0.664	0.272	Querétaro, Zona Baja	26	0.666	0.281
Zacatecas, Zona 02	39	0.67	0.295	Querétaro, Zona Alta	7	0.702	0.319
Nuevo León, Región 1	9	0.66	0.259	Sinaloa, Zona I	21	0.599	0.212
Nuevo León, Región 2	7	0.623	0.223	Sinaloa, Zona II	30	0.622	0.247
Nuevo León, Región 3	38	0.656	0.242	SLP000	103	0.682	0.289
Ciudad de México	34	0.675	0.323	SONRE1	57	0.62	0.238
Colima	17	0.669	0.26	SONRE2	21	0.583	0.199
Guanajuato	106	0.678	0.31	SONRE3	2	0.585	0.169
Veracruz	182	0.687	0.304	TAMZ01	81	0.664	0.266
Chihuahua, restantes	40	0.646	0.26	TAMZ02	20	0.662	0.266
CHIBAJ	18	0.669	0.294	TAMZ03	8	0.654	0.265
AGS000	50	0.684	0.298	CAM000	44	0.658	0.283
COA000	34	0.628	0.219	DUR000	83	0.677	0.29
EDM000	114	0.673	0.329	TAB000	32	0.668	0.278
GUECEN	55	0.689	0.309	Nayarit, Costa	14	0.634	0.282
GUECOS	38	0.69	0.335	Nayarit, Sierra	11	0.682	0.322
GUENOR	36	0.669	0.321	BCN000	38	0.644	0.222
HGOMAY	8	0.708	0.313	BCS000	75	0.61	0.187

En el cuadro 6 se muestran los valores obtenidos para cada región y para las duraciones de 2 y 8 días; llama la atención la poca diferencia entre los valores obtenidos para las diferentes regiones, de manera que, por ejemplo, para la duración de 2 días, el 75% de los valores está entre 0.66 y 0.702, y para 8 días, más de 80% entre 0.26 y 0.34. En resumen, los resultados obtenidos en este estudio permiten obtener, para cualquier sitio de la república, valores de precipitación media asociados con distintos

periodos de retorno, para duraciones entre 15 minutos y 30 días.

### Ejemplo para interpretación de resultados

Para facilitar la interpretación de los resultados obtenidos, se plantea el siguiente ejemplo:

Supóngase que el centroide de una cuenca de la región Oaxaca Istmo tiene coordenadas -94.559 longitud oeste y 16.733 latitud norte, de

tal manera que la media de las precipitaciones diarias máximas anuales sea de 140 mm (ver figura 4, o para mayor detalle la figura 6). De acuerdo con el cuadro 4, este valor se multiplica por 2.48 para estimar la precipitación asociada con 100 años de periodo de retorno, con lo que se obtiene un valor de 347.2 mm para la lluvia de un día con 100 años de periodo de retorno. Si el tiempo de concentración de la cuenca fuera de 1.5 h, se podría estimar un hietograma con

intervalos de media hora y una duración total de cuatro horas de la siguiente forma. De acuerdo con la figura 7, el factor de convectividad sería de 0.45, por lo que la precipitación en 1 h resulta de 156.2 mm. Para dicho valor del factor de convectividad, el cuadro 5 indica los factores que deben considerarse para las distintas duraciones. Dichos factores se reproducen en el cuadro 7. La tercera columna del cuadro 7 se obtuvo multiplicando los factores por 156.2 mm;

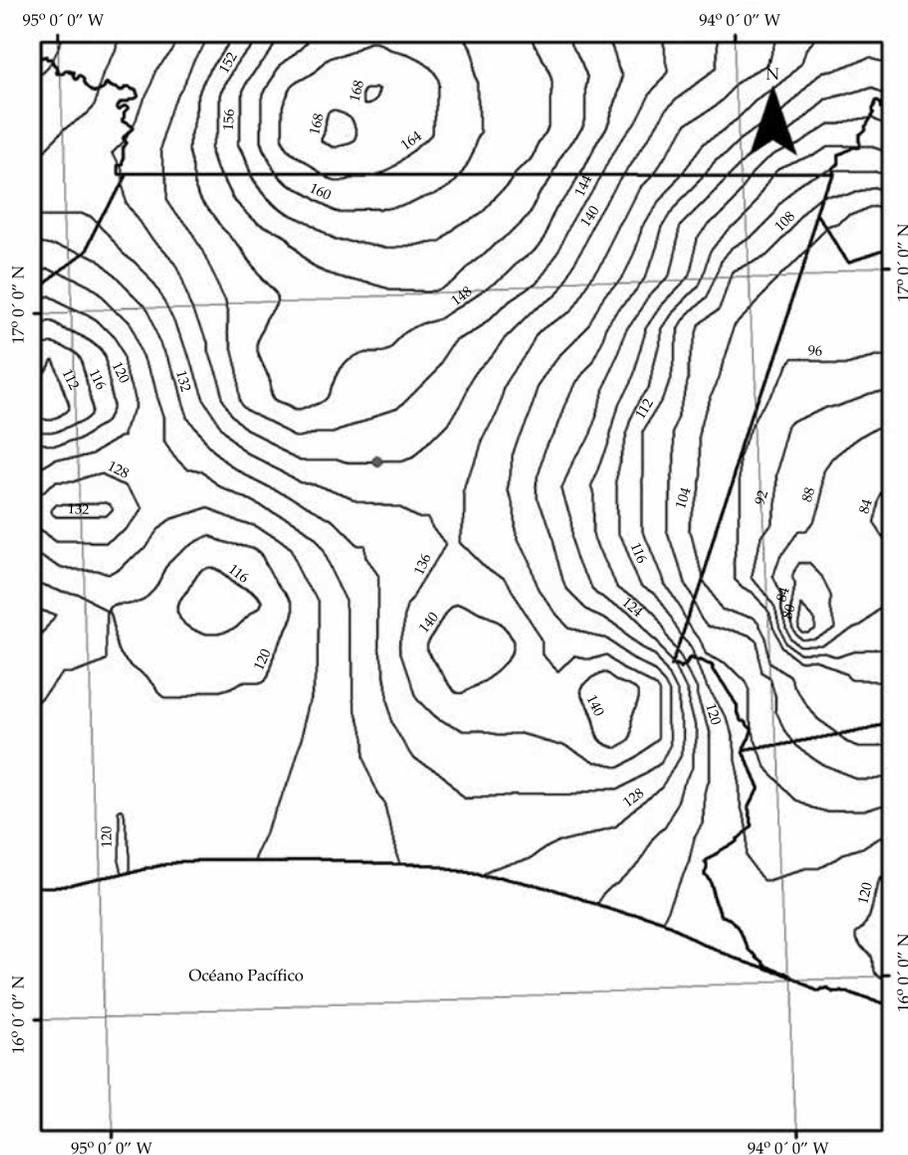


Figura 6. Región Istmo de Oaxaca (94.559 longitud oeste y 16.733 latitud norte).

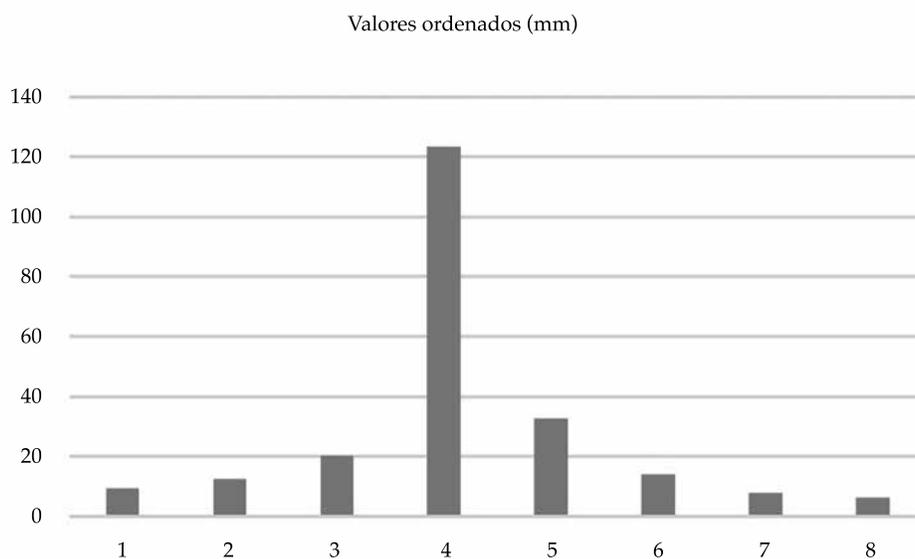


Figura 7. Hietograma para intervalos de 30 minutos y duración total de cuatro horas.

Cuadro 7. Estimación de un hietograma para intervalos de 30 minutos y duración total de cuatro horas.

Duración minutos	Factor respecto a 1 h	Precipitación acumulada (mm)	Incremento (mm)	Valores ordenados (mm)
30	0.79	148.52	148.52	10.68
60	1.00	188.00	39.48	14.80
90	1.13	213.31	25.31	25.31
120	1.22	229.36	16.05	148.52
150	1.30	244.16	14.80	39.48
180	1.35	253.80	9.64	16.05
210	1.41	264.48	10.68	9.64
240	1.45	272.60	8.12	8.12

en la cuarta se indican los incrementos cada media hora, y en la quinta esos mismos valores ordenados por bloques alternos, de manera que se obtiene el hietograma de la figura 7.

### Discusión

Los resultados obtenidos permiten estimar de manera robusta y espacialmente consistente lluvias para cualquier sitio de la república, cualquier periodo de retorno y cualquier duración. Con esos resultados se pueden construir también hietogramas de diseño.

Para comprobar el comportamiento estadísticamente homogéneo de los datos muestrales de precipitaciones máximas en una región, se usa tradicionalmente la prueba de Fisher, mediante la cual se comparan los cocientes de las varianzas correspondientes a los distintos sitios con los límites de la función de distribución de Fisher para una probabilidad de ser superados de, por ejemplo, el 5%.

Los valores obtenidos de los cocientes al cuadrado de los coeficientes de variación máxima entre el mínimo de cada región se muestran en el cuadro 8, en el que también se indica el tipo

de función de distribución que mejor se ajustó a la muestra ampliada correspondiente de cada región.

El análisis del cuadro 8 muestra que, en algunos casos, el cuadrado del cociente entre el coeficiente de variación máximo y el mínimo presenta valores muy grandes, por lo que al aplicar la prueba de Fisher se llegaría a la

conclusión de que algunas estaciones deberían eliminarse de la región correspondiente, a pesar de que se cuidó que para cada región se tuvieran climas y exposición a fenómenos meteorológicos similares y la separación entre regiones correspondiera a un partaguas bien definido. Se nota también en el cuadro que la mayoría de estos casos corresponde a regiones

Cuadro 8. Relaciones entre los coeficientes de variación máximo y mínimo de las estaciones comprendidas en cada región.

Entidad federativa	Región	Número estaciones	Coef. var. máximo	Coef. var. mínimo	Relación al cuadrado	Función de distribución*
Aguascalientes	Aguascalientes	50	0.46	0.24	3.67	G
Baja California Norte	Baja California Norte	37	1.31	0.41	10.21	DG
Baja California Sur	Baja California Sur	72	1.36	0.46	8.74	DG
Campeche	Campeche	42	0.93	0.26	12.79	DG
Chiapas	Angostura	36	0.88	0.22	16.00	DG
	Malpaso	17	0.66	0.24	7.56	DG
	Chicoasén	21	0.79	0.22	12.89	DG
	Peñitas	4	0.51	0.26	3.85	DG
	Almandro	11	0.82	0.24	11.67	DG
	Pichucalco	3	0.35	0.29	1.46	G
	Teapa	3	0.50	0.23	4.73	G
Chiuhuahua	Costa	28	0.57	0.23	6.14	DG
	Bajos	18	0.43	0.22	3.82	G
Coahuila	Restantes	40	0.96	0.24	16.00	DG
	Coahuila	28	1.04	0.31	11.25	DG
Colima	Colima	17	0.68	0.39	3.04	DG
Distrito Federal	Distrito Federal	30	0.50	0.21	5.67	G
Durango	Durango	83	1.07	0.23	21.64	DG
Estado de México	Estado de México	114	0.50	0.20	6.25	G
Guanajuato	Guanajuato	108	0.49	0.22	4.96	G
Guerrero	Norte	36	0.48	0.18	7.11	G
	Centro	56	0.68	0.32	4.52	G
	Costa	37	0.61	0.21	8.44	DG
Hidalgo	Menores	57	0.70	0.22	10.12	G
	Mayores	5	0.52	0.43	1.46	G
Jalisco	Interior	153	0.53	0.20	7.02	G
	Costa	23	0.58	0.30	3.74	G
Michoacán	Michoacán	93	0.65	0.18	13.04	G
Morelos	Morelos	44	0.64	0.20	10.24	G
Nayarit	Costa	14	0.40	0.25	2.56	G
	Sierra	11	0.33	0.19	3.02	G
Nuevo León	I	10	0.93	0.29	10.28	DG
	II	7	0.63	0.39	2.61	DG

Cuadro 8 (continuación). Relaciones entre los coeficientes de variación máximo y mínimo de las estaciones comprendidas en cada región.

Entidad federativa	Región	Número estaciones	Coef. var. máximo	Coef. var. mínimo	Relación al cuadrado	Función de distribución*
	III	38	1.01	0.38	7.06	DG
Oaxaca	Golfo	29	0.53	0.26	4.16	G
	Altiplano	82	0.74	0.18	16.90	DG
	Istmo	14	0.56	0.37	2.29	DG
	Pacífico	4	0.59	0.43	1.88	DG
Puebla	Norte	49	0.79	0.26	9.23	G
	Centro	34	0.67	0.21	10.18	G
	Sur	14	0.52	0.19	7.49	G
Querétaro	Zona Alta	7	0.49	0.26	3.55	G
	Zona Baja	27	0.64	0.24	7.11	G
Quintana Roo	Quintana Roo	20	0.64	0.28	5.22	DG
San Luis	San Luis	103	0.94	0.27	12.12	DG
Sinaloa	Zona I	21	0.77	0.39	3.90	DG
	Zona II	30	0.62	0.20	9.61	G
Sonora	Zona I	57	0.85	0.17	23.90	G
	Zona II	21	0.77	0.33	5.44	DG
	Zona III	2	0.77	0.77	1.00	DG
Tabasco	Tabasco	32	0.53	0.24	4.88	G
Tamaulipas	Zona I	81	0.87	0.27	10.38	DG
	Zona II	20	0.91	0.35	6.76	DG
	Zona III	8	0.51	0.31	2.71	DG
Tlaxcala	Tlaxcala	22	0.44	0.22	4.00	G
Veracruz	Veracruz	190	0.79	0.20	15.60	DG
Yucatán	Yucatán	30	0.68	0.30	5.13	G
Zacatecas	Zona I	11	0.54	0.28	3.72	G
	Zona II	39	0.45	0.22	4.18	G
	Total	2293				

\*G: Gumbel; DG: doble Gumbel.

en las que el mejor ajuste para la muestra ampliada se obtuvo con la función doble Gumbel. Dos casos muy notables son Sonora zona 1 y Veracruz, por lo que en seguida se comentan esos dos casos. En Sonora, el CV más grande (0.85) fue en la estación 26034, en la que, en el año 1972 se tiene registrado un máximo de 407 mm, siendo que en ese año, de todas las demás estaciones, lo máximo medido fue de 176 mm, y en todo el periodo de registro de todas las estaciones lo máximo medido fue de 240 mm; si se elimina el CV de los máximos

en esa estación quedaría de 0.525. En el otro extremo, el valor de CV mínimo es de 0.174 y corresponde a la estación 26101, en la que el máximo registrado es muy bajo (106 mm), a pesar de que la media es una de las más altas de la región, posiblemente porque no registró en los años en que ocurrieron las mayores tormentas (1978, 1994 y 2007). Si se eliminan estos dos valores, los CV extremos quedan en 0.69 (en la estación 26010 que sí midió en los años críticos) y 0.211, de manera que el cociente al cuadrado resulta de 10.6, en lugar de 23.9; si

todavía se eliminan los dos valores extremos, el cociente al cuadrado resulta de 3.89.

Algo parecido ocurre en Veracruz, donde se tiene un registro de 690 mm en la estación 30031 en 1978, año que no se caracterizó por grandes tormentas, y en el que el máximo registrado en las otras 189 estaciones fue de 364 mm. Si se elimina ese valor, el CV máximo resulta de 0.67 y el cuadrado del cociente entre valores extremos se reduce de 15.60 a 11.2. Además, si de las 190 estaciones de esta región se eliminan también los dos valores más pequeños del CV, el cociente se reduce a 7.2, valor que resulta lógico, si se considera que corresponde a 187 estaciones.

### Generación de series sintéticas

Considerando que se trata de eventos extremos, cuya distribución de probabilidades no es normal, se realizaron pruebas mediante la comparación entre los coeficientes de variación de las muestras históricas y los que se obtienen al generar números aleatorios con la distribución de probabilidades ajustada a las muestras

regionales. Para cada una de las 59 regiones se generaron 10 muestras sintéticas, con el mismo número de valores que los de la muestra histórica correspondiente. En las figuras 8 y 9 se comparan las distribuciones de frecuencias acumuladas de los CV históricos y sintéticos para los casos extremos de las regiones Morelos, y La Angostura en Chiapas. En cada caso se generaron 10 muestras sintéticas, cada una de las cuales constaba del mismo número de valores que el de años registrados en cada estación de la región correspondiente.

En el primer caso (región Morelos) se observa un buen comportamiento, excepto para una estación con un coeficiente de variación de 0.64 (que fue el máximo en esa zona en la que el siguiente valor fue de 0.45). La estación es la número 17045 y en sus datos de precipitaciones máximas anuales aparece un valor de 200 mm en 1977, año en el que lo máximo registrado en todas las demás estaciones fue de 87 mm, por lo que se recurrió a verificar el dato, con ayuda de la GASIR, en el registro original, y se encontró que el máximo en ese año fue en realidad de

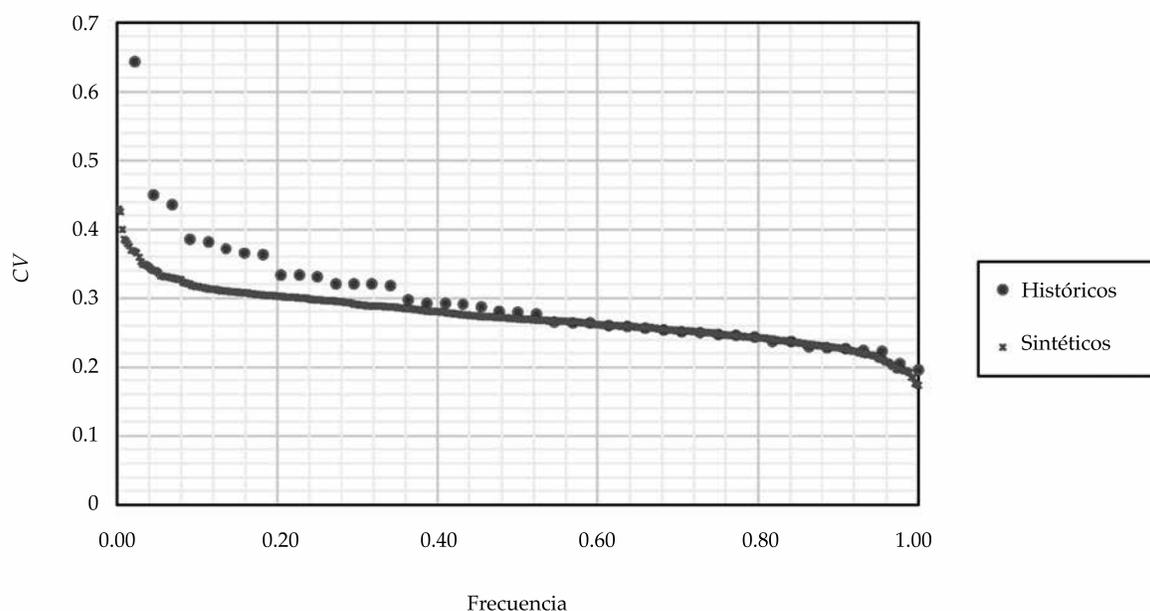


Figura 8. Comparación entre las frecuencias empíricas de los coeficientes de variación de la muestra histórica y la muestra generada. Región Morelos.

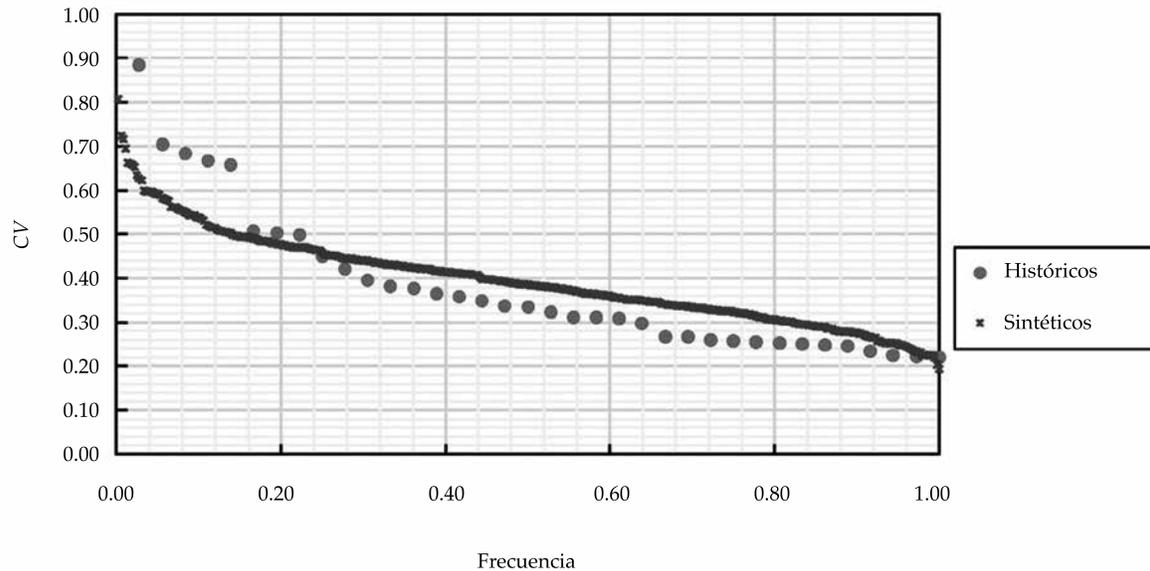


Figura 9. Comparación entre las frecuencias empíricas de los coeficientes de variación de la muestra histórica y la muestra generada. Región La Angostura, en Chiapas.

57.4 y al modificarlo el coeficiente de variación bajó a 0.332.

En el caso de la región Angostura, en Chiapas, aunque el comportamiento de las frecuencias relativas de los CV históricos y los CV generados es similar (figura 9), el valor del CV máximo histórico (0.88, correspondiente a la estación 7119, con 66 años de registro) es mayor que el máximo generado con las 10 muestras sintéticas (0.81), por lo que se procedió a analizarlo con mayor detalle, y se encontró que corresponde a un registro de 320 mm el 5 de octubre de 2005, fecha en la que se presentaron varios valores altos en las estaciones cercanas, por lo que se decidió conservar ese valor.

En el cuadro 9 se muestran los coeficientes de variación de cada una de las otras 12 regiones (de las 59 consideradas), en las que el cuadrado del cociente de los coeficientes de variación es mayor que 10.

Para cada una de estas 12 regiones se generaron también 10 muestras sintéticas, cada una con el mismo número de valores que el registro histórico. En el cuadro 9 se marcaron con verde los coeficientes de variación históricos mayores

en más de 20% que el máximo obtenido con las series generadas, y con amarillo los que son mayores o menores que los valores extremos obtenidos con las muestras generadas, pero en los que las diferencias son menores al 20%. Se puede observar que de las 12 regiones, en cinco el coeficiente de variación CV histórico supera al sintético en más del 20%, y en una hay dos estaciones en las que esto ocurre; hay además 13 estaciones (de las más de 2 000 estudiadas) en las que el coeficiente de variación histórico supera al sintético, pero en menos del 20%, y ocho en las que el CV histórico mínimo es menor que el sintético en menos de 20%. Para los casos que parecieron más extraños se hizo una solicitud de verificación a la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR) de la Conagua, con los resultados que se muestran en el cuadro 10. De acuerdo con la información proporcionada por la GASIR, los valores de los coeficientes de variación del cuadro 8 se modifican de la siguiente forma:

El valor de 1.315 de BCN cambia a 0.817; el 0.934 de Campeche pasó a 0.74; el 0.792 de Chicoasén es correcto; el 0.822 de Almandro

Cuadro 9. Coeficientes de variación de cada estación para las 12 regiones (de las 59 consideradas) en las que el cuadrado del cociente de los coeficientes de variación es mayor que 10.

BCN	Campeche	Chiapas	Chiapas	Chihuahua	Coahuila	Durango	Hidalgo	Michoacán	Oaxaca	Puebla	Nuevo León
		Chicoasén	Almandro	Restantes			Menores		Altiplano	Centro	Reg. 1
Coef. var.											
1.315	0.934	0.792	0.822	0.958	1.044	1.070	0.700	0.647	0.738	0.669	0.933
0.969	0.658	0.461	0.465	0.714	0.875	0.879	0.620	0.618	0.680	0.483	0.573
0.950	0.655	0.409	0.410	0.662	0.744	0.634	0.602	0.593	0.662	0.481	0.522
0.826	0.643	0.389	0.406	0.655	0.632	0.583	0.569	0.586	0.648	0.438	0.499
0.777	0.635	0.386	0.383	0.601	0.628	0.582	0.535	0.555	0.598	0.393	0.475
0.776	0.634	0.367	0.369	0.599	0.624	0.561	0.516	0.501	0.588	0.386	0.433
0.738	0.627	0.365	0.312	0.492	0.609	0.523	0.515	0.494	0.565	0.376	0.418
0.663	0.596	0.350	0.308	0.489	0.597	0.521	0.513	0.490	0.564	0.375	0.355
0.616	0.594	0.330	0.298	0.484	0.596	0.513	0.512	0.449	0.557	0.371	0.322
0.602	0.579	0.326	0.264	0.482	0.591	0.505	0.502	0.440	0.557	0.355	0.289
0.596	0.576	0.296	0.245	0.479	0.588	0.502	0.497	0.435	0.557	0.355	
0.581	0.554	0.286		0.469	0.553	0.492	0.485	0.435	0.554	0.354	
0.581	0.544	0.272		0.467	0.548	0.485	0.472	0.427	0.537	0.352	
0.572	0.540	0.272		0.457	0.529	0.484	0.464	0.425	0.532	0.332	
0.571	0.512	0.269		0.455	0.513	0.481	0.448	0.417	0.526	0.331	
0.570	0.511	0.266		0.442	0.510	0.480	0.447	0.411	0.513	0.331	
0.570	0.511	0.246		0.437	0.497	0.477	0.444	0.409	0.505	0.324	
0.556	0.503	0.237		0.435	0.497	0.454	0.433	0.404	0.500	0.323	
0.550	0.478	0.234		0.432	0.495	0.453	0.430	0.395	0.491	0.318	
0.550	0.473	0.219		0.429	0.491	0.452	0.428	0.394	0.477	0.308	
0.545	0.465			0.427	0.491	0.450	0.420	0.390	0.466	0.300	
0.528	0.461			0.417	0.490	0.447	0.420	0.381	0.458	0.289	
0.528	0.461			0.412	0.490	0.440	0.408	0.376	0.432	0.287	
0.520	0.459			0.411	0.482	0.438	0.404	0.374	0.428	0.285	
0.517	0.458			0.404	0.466	0.433	0.402	0.373	0.427	0.279	
0.516	0.454			0.399	0.462	0.432	0.400	0.368	0.418	0.272	
0.510	0.445			0.398	0.444	0.431	0.389	0.365	0.410	0.266	
0.507	0.436			0.395	0.436	0.431	0.387	0.364	0.408	0.265	
0.482	0.436			0.364	0.435	0.429	0.387	0.361	0.406	0.263	
0.477	0.432			0.352	0.429	0.423	0.382	0.360	0.404	0.255	
0.476	0.424			0.340	0.428	0.419	0.378	0.358	0.402	0.252	
0.469	0.419			0.335	0.404	0.415	0.362	0.357	0.401	0.244	
0.459	0.412			0.328	0.369	0.414	0.354	0.349	0.399	0.244	
0.450	0.412			0.319	0.321	0.408	0.354	0.349	0.398	0.210	
0.440	0.394			0.317	0.313	0.406	0.351	0.348	0.390		
0.421	0.381			0.315		0.405	0.342	0.339	0.387		
0.420	0.374			0.303		0.401	0.339	0.339	0.381		
0.407	0.367			0.279		0.399	0.334	0.338	0.380		
	0.366			0.263		0.393	0.330	0.333	0.373		
	0.363			0.240		0.389	0.326	0.333	0.369		

Cuadro 9 (continuación). Coeficientes de variación de cada estación para las 12 regiones (de las 59 consideradas) en las que el cuadrado del cociente de los coeficientes de variación es mayor que 10.

BCN	Campeche	Chiapas	Chiapas	Chihuahua	Coahuila	Durango	Hidalgo	Michoacán	Oaxaca	Puebla	Nuevo León
		Chicoasén	Almandro	Restantes			Menores		Altiplano	Centro	Reg. 1
Coef. var.											
	0.360					0.385	0.324	0.333	0.368		
	0.344					0.384	0.323	0.330	0.367		
	0.335					0.379	0.319	0.329	0.366		
	0.303					0.379	0.315	0.328	0.363		
	0.288					0.373	0.309	0.324	0.363		
	0.263					0.370	0.307	0.320	0.358		
						0.367	0.306	0.317	0.354		
						0.366	0.297	0.315	0.354		
						0.365	0.293	0.313	0.353		
						0.365	0.288	0.311	0.350		
						0.362	0.285	0.310	0.348		
						0.362	0.272	0.308	0.348		
						0.361	0.271	0.307	0.348		
						0.357	0.265	0.305	0.344		
						0.357	0.260	0.303	0.340		
						0.354	0.249	0.303	0.340		
						0.354	0.229	0.301	0.340		
						0.354	0.218	0.295	0.339		
						0.350		0.293	0.338		
						0.349		0.292	0.315		
						0.346		0.290	0.312		
						0.341		0.289	0.311		
						0.339		0.288	0.309		
						0.337		0.288	0.307		
						0.334		0.284	0.304		
						0.329		0.283	0.297		
						0.325		0.281	0.295		
						0.315		0.281	0.294		
						0.299		0.280	0.287		
						0.298		0.274	0.282		
						0.298		0.272	0.282		
						0.282		0.272	0.276		
						0.279		0.267	0.275		
						0.276		0.260	0.273		
						0.275		0.257	0.272		
						0.273		0.255	0.258		
						0.266		0.247	0.253		
						0.266		0.246	0.251		
						0.260		0.244	0.241		
						0.253		0.243	0.241		

Cuadro 9 (continuación). Coeficientes de variación de cada estación para las 12 regiones (de las 59 consideradas) en las que el cuadrado del cociente de los coeficientes de variación es mayor que 10.

BCN	Campeche	Chiapas	Chiapas	Chihuahua	Coahuila	Durango	Hidalgo	Michoacán	Oaxaca	Puebla	Nuevo León
		Chicoasén	Almandro	Restantes			Menores		Altiplano	Centro	Reg. 1
Coef. var.											
						0.251		0.241	0.202		
						0.238		0.231	0.175		
						0.228		0.231			
								0.230			
								0.229			
								0.221			
								0.220			
								0.208			
								0.207			
								0.199			
								0.198			
								0.186			
								0.180			

Cuadro 10. Resultados de la verificación de datos dudosos.

Datos dudosos de estaciones climatológicas						
Estado	Estación	Valor (mm)	Año	Mes	Día	
Baja California Norte	2046	240	1972	10	4	GASIR recomienda eliminarlo
	2046	170	1973	9	25	GASIR no encuentra información, se eliminó
Campeche	4006	380	1950	10	8	Dice GASIR que es 38
	4006	200	1995	8	20	Correcto
Chiapas	7033	400.9	1985	7	6	Dice GASIR que es 40.9
	7067	201.1	1970	7	5	Correcto
Puebla	21114	250	1963	7	3	Correcto
	21080	179.1	2000			Es 17.9
		171	1999	9	13	Es 17.1
Sonora	26034	407	1972	8	9	Correcto
Veracruz	30031	690	1978	7	10	GASIR no encuentra información, se eliminó
Morelos	17045	200	1977	8	24	Es 57.4 el día 12
Chihuahua	8005	320	1929			Eliminarlo, el máx mensual es 8 mm
Coahuila	5003	280	1976	9	19	Es 28
	5003	200	1978	9	27	GASIR no encuentra información, se eliminó
	5003	280	1977	7	14	Es 20
Durango	10016	280	1997	7	27	GASIR no encuentra información, se eliminó
	10033	250	1974	9	2	Dato correcto
		240	1987	8	30	GASIR no encuentra información, se eliminó
	10045	220	1978	8	30	Correcto
Nuevo León	19009	324	2010	6	31	Correcto, huracán <i>Alex</i>
		243	2005	7	20	Correcto, huracán <i>Emily</i>

pasó a 0.51; para Chihuahua desaparece el 0.958; para Coahuila desaparece el 1.044; para Durango desaparece el 1.070 y el 0.879 pasa a 0.755; y para Puebla centro desaparece el 0.669. Es decir, que con estas correcciones sólo quedan dos estaciones en las que el CV histórico supera al sintético en más del 20%, y 12 en las que lo supera, pero en menos del 20%.

## Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se analizó el registro de precipitaciones máximas anuales obtenido para 2 193 estaciones con más de 20 años de registro. Se muestra la importancia de realizar un esfuerzo para depurar los datos de precipitaciones diarias máximas anuales obtenidos de la base de datos CLICOM. Con los datos depurados se definieron 59 regiones consideradas homogéneas (en relación con las precipitaciones diarias máximas anuales). Para definir las regiones se consideraron los coeficientes de variación de las precipitaciones máximas anuales registradas en cada estación, pero también su ubicación geográfica y el grado de exposición a fenómenos meteorológicos extremos.

La hipótesis de homogeneidad se verificó con un método propuesto en este trabajo, que se basa en generar muestras sintéticas obtenidas de la función de distribución de las lluvias máximas anuales moduladas, dividiendo cada valor entre la media de dichos máximos correspondiente a cada estación.

El análisis de los registros de las 2 193 estaciones que cumplieron con las condiciones planteadas permitió llegar a resultados con los que se pueden obtener, de manera confiable, los valores de precipitación asociados con cualquier periodo de retorno tanto para duraciones menores de un día como para duraciones entre 1 y 30 días, para cualquier sitio de la república mexicana.

El método utilizado se basa en obtener un mapa con los valores de las medias de las precipitaciones máximas anuales, medias que se consideran muy confiables, porque en todos los

casos fueron calculadas con al menos 20 años de registro. Para obtener los valores correspondientes a distintos periodos de retorno, los valores de la media de cada estación se multiplican por factores regionales obtenidos para 59 regiones homogéneas.

Se presenta una discusión amplia respecto a la definición de las 59 regiones consideradas homogéneas. Dicha discusión muestra, por un lado, que la prueba de Fisher no es suficiente para comparar los coeficientes de variación obtenidos en cada región (principalmente porque está diseñada para muestras que se ajustan a una distribución normal) y que se puede realizar un análisis más completo generando muestras sintéticas que correspondan a la función de distribución real, de manera que se puede comparar la curva de frecuencias acumuladas de los CV obtenidas a partir de esas muestras con la correspondiente a los valores históricos.

Para pasar de los valores correspondientes a duraciones menores de un día se utilizó la teoría de Chen, pero adaptada por Baeza a las condiciones de México. Los resultados permiten estimar hietogramas de diseño para cuencas con tiempos de concentración menores de un día. En el caso de las lluvias asociadas con duraciones mayores de un día (que se requieren para el análisis de cuencas grandes), se lograron obtener, para todas las regiones, factores que las relacionan con las de un día, de manera que pueden obtenerse hietogramas de diseño con valores diarios.

Se recomienda realizar estudios en toda la república (existen ya algunos para regiones específicas) que permitan estimar factores de reducción por área, con los cuales se pueda pasar de los hietogramas puntuales a los que se refieren los párrafos anteriores a hietogramas promedio para cada cuenca.

La información detallada de los distintos resultados de este estudio (mapas como el de la figura 6, funciones de distribución ajustada a los máximos anuales normalizados para cada una de las 59 regiones, etc.) puede ser solicitada a los autores de este trabajo.

## Agradecimientos

Agradecemos al Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred) el apoyo para realizar esta investigación; a los maestros Carlos Baeza y Manuel Mendoza por las facilidades otorgadas para el manejo de los datos que recopilamos; a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes por las facilidades que nos dieron para utilizar sus archivos, y a la Conagua por su apoyo para verificar algunos datos en el registro original. Al ingeniero Mario Roldán Leal por el apoyo en la preparación del artículo con el formato de la guía de autores.

## Referencias

- Baeza, R. C. (2007). *Estimación regional de factores de conectividad para el cálculo de las relaciones intensidad-duración-frecuencia*. Tesis de Maestría. México, DF: Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM.
- Bell, F. C. (1969). Generalized rainfall-duration-frequency relationships (P. o. Engineers, Ed.). *Journal of the Hydraulics Division*, 95(HY1), 311-327.
- Berndtsson, R., & Niemczynowicz, J. (1988). Spatial and temporal scales in rainfall analysis - some aspects and future perspectives. *Journal of Hydrology*, (100), 293-313.
- Buishand, T. A. (1991). Extreme rainfall estimation by combining data from several Sites. *Hydrological Sciences Journal*, 36(4), 345-365, DOI: 10.1080/02626669109492519.
- Campos-Aranda, D. F. (2008). Ajuste regional de la distribución GVE en 34 Estaciones pluviométricas de la zona Huasteca de San Luis potosí, México/Regional fit of GEV distribution in 34 pluviometric stations of the Huasteca area in San Luis Potosi State, Mexico. *Agrociencia*, 42(1), 57-70.
- Campos-Aranda, D. F. (2014). Análisis regional de frecuencia de crecientes en la región hidrológica no. 10 (Sinaloa), México. 1: índices de estacionalidad y regiones de influencia/Regional flood frequency analysis at hydrological region no. 10 (Sinaloa), Mexico. 1: Seasonality measures and regions of influence. *Agrociencia*, 48(2), México.
- Chen, C. L. (1983). Rainfall intensity-duration-frequency formulas (ASCE, Ed.). *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(12), 1603-1621.
- Chow, D. R., Maidment, L., & Mays, W. (1988). *Applied hydrology* (572 pp.). McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering. New York: McGraw-Hill. New York
- Conagua (2015). *Atlas del agua en México 2015*. México, DF: Comisión Nacional del Agua. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/ATLAS2015.pdf>.
- Conde, R. R., Vita, G. A., Castro, O. V. A., & López, M. J. R. (2014). Construcción de curvas i-d-tr de las estaciones climatológicas de México a partir de la base de datos pluviométricos SMN-Conagua. *Memorias del XXIII Congreso Nacional de Hidráulica*, Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- Conleth, C. (1988). Methods and merits of regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 100, 269-290.
- Cortés, L. C. N. (2003). *Regionalización de tormentas de diseño en la cuenca del Valle de México. Proyecto terminal* (63 pp.). México, DF: UAM Iztapalapa. Recuperado de <http://148.206.53.84/tesiuami/UAMII0552.pdf>.
- Cunnane, C. (1988). Methods and merits of regional flood frequency analysis. *J. Hydrol.*, 100, 269-290.
- Dalrymple, T. (1960). *Flood frequency analysis. Manual of hydrology: Part 3. Flood flow techniques. Methods and practices of the geological survey* (80 pp.). Washington, DC: US Government Printing Office.
- Domínguez, M. R., Capella, V. A., Luna, V. J. A., Fuentes, M. O. A., Carrizosa, E. E., Peña, D. F., & Carabela, H. J. C. (2014). *Cap. A.1.6. Análisis estadístico sección A: hidrotecnia. Tema 1: hidrología. Manual de diseño de obras civiles*. México, DF: Comisión Federal de Electricidad.
- Domínguez, M. R., Carrizosa, E. E., Fuentes, M. G. E., Galván, T. A. E., Salas, S. M. A., Robles, M. T. P., Baeza, R. C., & González, O. S. (2012). Mapas de precipitaciones para diferentes periodos de retorno y duraciones. *Memorias del XXII Congreso Nacional de Hidráulica*, Acapulco, Guerrero, México.
- Dominguez-Mora, R., Bouvier, C., Neppel, L., & Niel, H. (2005). Approche régionale pour l'estimation des distributions ponctuelles des pluies journalières dans le Languedoc-Roussillon (France). *Hydrological Sciences Journal des Sciences Hydrologiques*, 50(1), 1-29.
- Escalante-Sandoval, C. A., & Domínguez-Esquivel, J.Y. (2001). Análisis regionales de precipitación con base en una distribución bivariada ajustada por máxima entropía. *Ingeniería Hidráulica en México*, 16(3), 91-102.
- Escalante, C., & L. Reyes. (2005) Técnicas Estadísticas en Hidrología. Facultad de Ingeniería, UNAM. 1110 p. México. 2005.
- Escalante-Sandoval, C. A., & Amores-Rovelo, L. (2014). Influencia de la delimitación de regiones homogéneas en la estimación de lluvias máximas diarias (pp. 1-6). *Memorias del XXIII Congreso Nacional de Hidráulica*, Puerto Vallarta, Jalisco, México, octubre 2014.
- Gellens, D. (2002). Combining regional approach and data extension procedure for assessing GEV distribution of extreme precipitation in Belgium. *Journal of Hydrology*, 268, 113-126.
- Guichard, R. D., & Domínguez, M. R. (1988). Regionalización de lluvias en la cuenca del Alto Grijalva. *Quehacer Científico en Chiapas*, 1(2), 83-93.
- Koutsoyiannis, D. (2009a). *Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: I. Theoretical investigation*. Zographou,

- Greece: Department of Water Resources, Faculty of Civil Engineering, National Technical University of Athens, Heron Polytechniou, 5, GR-157 80.
- Koutsoyiannis, D. (2009b). *Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: II. Empirical investigation of long rainfall records*. Zographou, Greece: Department of Water Resources, Faculty of Civil Engineering, National Technical University of Athens, Heron Polytechniou, 5, GR-157 80.
- Luna, V. J. A. (2013). *Predicción y pronóstico de tormentas en regiones de montaña - aplicación en la cuenca del río La Paz, Bolivia*. Tesis doctoral. México, DF: Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM.
- Magaña, R. V. O., & Galván, O. V. M. (2010). Detección y atribución de cambio climático a escala regional. Realidad datos y espacio. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 1(1), 73-82.
- Mendoza, G. M. (2001). *Factores de regionalización de lluvias máximas en la república mexicana*. Tesis de Maestría. México, DF: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Rossi, F., Fiorentino, M., & Versace, P. (1984). Two-component extreme value distribution for flood frequency analysis. *Water Resources Research*, 20(7), 847-856.
- SCT (1990). *Isoyetas de intensidad-duración-frecuencia. República mexicana* (495 pp.). México, DF: Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Subsecretaría de Infraestructura.
- St-Hilaire, A., Ouarda, T. B. M. J., Lachance, M., Bobée, B., Barbet, M., & Bruneau, P. (2003). La régionalisation des précipitations: une revue bibliographique des développements. Récentes *Revue des sciences de l'eau. Journal of Water Science*, 16(1), 27-54.
- Yang, T., Shao, Q., Hao, Z.-C., Chen, X., Zhang, Z., Xu, C. Y., & Sun, L. (2010) Regional frequency analysis and spatio-temporal pattern characterization of rainfall extremes in the Pearl River Basin, China. *Journal of Hydrology*, 380, 386-405.
- Wotling, G., Bouvier, Ch., Danloux, J., & Fritsch, J. M. (2000). Regionalization of extreme precipitation distribution using the principal components of the topographical environment. *Journal of Hydrology*, (233), 86-101.

## Dirección institucional de los autores

Dr. Ramón Domínguez  
M.I. Eliseo Carrizosa  
M.I. Guadalupe E. Fuentes  
Dra. Maritza L. Arganis  
M.I. Javier Osnaya  
M.I. Andrés E. Galván-Torres

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)  
Instituto de Ingeniería  
Circuito Escolar s/n, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán  
04510 Ciudad de México, MÉXICO  
rdominguezm@iingen.unam.mx  
ecarrizosae@iingen.unam.mx  
gfuentesm@iingen.unam.mx  
marganisj@iingen.unam.mx  
josnayar@iingen.unam.mx  
andresgalvant@gmail.com



Descarga de agua tratada en el canal principal de la presa Constitución de 1957 en el Distrito de Riego 023, San Juan del Río Querétaro.

Foto: Anaí de la Torre González.

# Evaluation of water use efficiency in irrigated agriculture supported by satellite images

• Enrique Palacios-Vélez •

*Colegio de Postgraduados, Carretera México-Texcoco, Mexico*

• Luis A. Palacios-Sánchez •

*Servicios de Estudios en Ingeniería y Sistemas, S. A. de C. V., Hermosillo, Mexico*

• José L. Espinosa-Espinosa\* •

*Colegio de Postgraduados, Carretera México-Texcoco, Mexico*

\*Correspondence author

DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-02

## Abstract

Palacios-Vélez, E., Palacios-Sánchez, L. A., & Espinosa-Espinosa, J. L. January-February, 2018). Evaluation of water use efficiency in irrigated agriculture supported by satellite images. *Water Technology and Sciences* (in Spanish), 9(1), 31-38, DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-02.

To evaluate the water use efficiency is a necessary condition to improve water productivity. The overall water use efficiency is the product of conveyance efficiency in the largest and minor irrigation canal systems, multiplied by the application efficiency at the users' plots. Conveyance efficiency is achieved by measuring the water delivered at the irrigated plots between the amounts of water taken from the sources of supply. These measurements are generally carried out by the personnel operating the irrigation systems. In most of the districts, these measurements are usually carried mandatory to report to the National Water Commission, with a variable precision. However, the water application efficiency in the users' plots is much more difficult to be done, because the measurement of water consumption by plants is not easy to assess. Indeed, the efficiency in plot irrigation, is the ratio of crop water evapotranspiration between the amounts of water applied, both measurements are difficult to perform. However, in recent years it has been possible to estimate water consumption by crops using satellite imagery. Thus, in this paper, a methodology used in the Mayo River Irrigation District in Sonora, Mexico is shown for the last agricultural cycle 2015-2016 using Landsat 7 and 8 satellite images, with acceptable results. This methodology is based on the PLEIADES project 2007 – 2010.

**Keywords:** NDVI, evapotranspiration, Kc, water use efficiency.

## Resumen

Palacios-Vélez, E., Palacios-Sánchez, L. A., & Espinosa-Espinosa, J. L. (enero-febrero, 2018). Evaluación de la eficiencia del uso del agua en la agricultura apoyada por imágenes de satélite. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(1), 31-38, DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-02.

Evaluar la eficiencia del uso del agua es una condición necesaria para mejorar la productividad del agua. La eficiencia total es el producto de la eficiencia de conducción tanto de canales de riego mayores y menores, multiplicado por la eficiencia de aplicación a nivel parcelas. La eficiencia de conducción se logra mediante la medición del agua entregada en las parcelas al ser extraída de las fuentes de abastecimiento. Estas mediciones son hechas por lo general por el personal que opera los sistemas de riego en los distritos y unidades de riego. En la mayoría de los distritos de riego estas mediciones suelen ser obligatorias para reportarse a la Comisión Nacional del Agua, con una variable de precisión. Sin embargo, la eficiencia en la aplicación del agua en las parcelas de los usuarios es mucho más difícil de llevarse a cabo, porque la medición del consumo de agua por las plantas no es fácil de evaluar. En efecto, la eficiencia de riego parcelaria es la relación entre el agua evapotranspirada por los cultivos entre el agua aplicada en el riego; ambas mediciones son difíciles de efectuar. Sin embargo, en los últimos años se ha logrado estimar el consumo de agua por los cultivos mediante el uso de imágenes satelitales. Así, en el presente trabajo se muestra una metodología empleada en el Distrito de Riego Río Mayo en Sonora, México, para el último ciclo agrícola 2015-2016, utilizando imágenes de satélite Landsat 7 y 8, con resultados bastante aceptables. Esta metodología se basa en el proyecto PLEIADES 2007-2010.

**Palabras clave:** NDVI, evapotranspiración, Kc, eficiencia uso del agua.

Received: 01/30/2017

Accepted: 08/07/2017

## Introduction

Estimation of the water use efficiency at the farm level has been a challenge, because it is not easy to measure crop evapotranspiration. The gravimetric method, which involves taking soil samples to determine moisture content by weighing the wet and then the dry soil, and to estimate the specific gravity for each sample at various places on a plot, are very difficult and expensive. Due to the spatial variability of soil, it requires taking several samples from each plot of each crop which would involve many people to do this task.

The use of lysimeters is another method that requires the construction of these devices which is usually done in research institutions, but its use is not possible in every crop or plot of interest. Turbulent flow measure devices (Eddy Correlation) are also used, but the cost is high and is generally used to calibrate other more simplistic methods.

There are several empirical or semi-empirical methods that have been used to estimate water use of crops for many years, among them, the method of Thornthwaite, Blaney and Criddle, Penman-Monteith, which generally attempt to estimate the potential or reference evapotranspiration, which measures the evapotranspiration demand by climatic factors. On the other hand, the crop evapotranspiration is generally very variable since it depends on the crop vegetative development, on the spatial variability of soil, on water stress in the plant and many other factors whose variability is difficult to assess. Currently available automatic weather stations can be used to estimate the reference evapotranspiration by the Penman-Monteith equation, with software that is installed in the automatic weather station (Palacios, 2002).

As mentioned before, the crop evapotranspiration is highly variable and it is usually estimated, affecting the reference evapotranspiration by a dimensionless factor called crop coefficient ( $K_c$ ) (Allen, Pereira, Raes, & Smith,

1998). The crop coefficient changes according to the crop development. Interestingly, this factor can be estimated based on a vegetation index called  $NDVI$ , which can be obtained using satellite images. In this regard, it should be noted that compared with METRIC, a model developed by the University of Idaho, the method described in this article is easier to develop and gives similar results in the estimation of the water use efficiency when used properly (Palacios & Flores, 2013).

## Materials and methods

The overall water use efficiency in irrigated agriculture is defined as the ratio of the volume of water used by the crops, also referred as consumptive use, and the amount of water taken from the sources of supply, in addition to the effective rainfall for irrigation. It is represented by the following function:

$$Ewu = \frac{V}{Ve + Vpe} \quad (1)$$

Where:

$Ewu$  - Water use Efficiency, dimensionless.

$Vu$  - Volume used by the crops,  $m^3$ .

$Ve$  - Volume extracted from different sources,  $m^3$ .

$Vpe$  - Volume of effective rainfall,  $m^3$ .

It should be noted that in several cases it is also considered the amount of water required by the crop for washing salts, but in this case it has not been taken into consideration.

The assessment of the overall efficiency of the water is important because it allows us to estimate the water that is wasted, which is vital in the case of Mexico, there are already major water shortages in most of the agricultural areas of the country where it has been noted with concern that the irrigated area in the past 30 years has not changed despite huge investments that have been made.

In the irrigation districts of Mexico, the water is obtained from different sources, in general it can be measured and it is usually measured or estimated with acceptable accuracy. The volume of effective rainfall is difficult to estimate, but there are several empirical methods that can do a reasonable approximation. Estimation of the water used by every planted crop and every plot is the most difficult task to achieve.

There are several methods to estimate water consumption by plants ( $ET_c$ ), but one of the most commonly used methods is the product of the so-called reference evapotranspiration ( $ET_r$ ) multiplied by a crop coefficient, dimensionless  $K_c$ , so the function for the calculation is:

$$ET_c = K_c ET_r \quad (2)$$

Potential evapotranspiration and more recently called reference  $ET_r$ , is a crop that has no restriction of water generally of small size as grass or alfalfa, which completely covers the ground as defined by Rosenberg (1974). Nowadays, this variable can be calculated with the Penman-Monteith method, which can already be obtained from an automatic weather station in which the software for this calculation has been incorporated.

The value of  $K_c$  coefficient is more difficult to be obtained because it involves the measurement of actual evapotranspiration of a crop, which requires special equipment, such as a weighing lysimeter with unchanged soil structure or using a turbulent flow measurement station (Eddy Correlation). However, the water consumption of each crop can be highly variable, since it depends not only on the crop but also on other variables such as fertilization, and water stress, among others, therefore calculation can be made using different methods, as proposed by the FAO (Allen et al., 1998), it considers crops grown under standard conditions, which take place in vast fields under agronomic excellent condition without limitations of soil moisture.

In the year 2000, the project “DEmonstration of Earth observation Technologies in Routine

irrigation advisory services” (DEMETER) financed by the European Commission, supported to the Mediterranean Nations of Europe to improve water use efficiency. During five years, several researches were performed, among them, one research was to look for a linear relationship between the vegetation index  $NDVI$  and the  $K_c$ .

The  $NDVI$  is calculated from the reflectance of the red and infrared bands of satellite images according to the following function:

$$NDVI = \frac{\rho_{ir} - \rho_r}{\rho_{ir} + \rho_r} \quad (3)$$

Where:

$\rho_{ir}$  – Infrared band reflectance.

$\rho_r$  – Red band reflectance.

Thus, D’Urso and Calera (2006), in the *Proceedings of the AIP Conference* discussed, in some detail, this linear relationship between  $NDVI$  and  $K_c$  and derived general function relating these two variables as shown below:

$$K_c = 1.25NDVI + 0.2 \quad (4)$$

Subsequently, Calera and Gonzalez (2007), in a document from the project “Participatory multi-Level EO-assisted water Tools for Irrigation Management and Agricultural Decision-Support” (PLEIADES), also funded by the European Commission, presented a similar function as:

$$K_c = 1.15NDVI + 0.17 \quad (5)$$

This linear relationship between  $NDVI$  and  $K_c$ , can be clearly seen by plotting the figure mentioned in the FAO publication (Allen, Pereira, Smith, Raes, & Wright, 2005) and adding the position of the  $NDVI$  values obtained from satellite images as shown in figure 1.

As part of the PLEIADES (2007-2010) project, measurements were carried out in the Irrigation District of the Rio Yaqui, Sonora State, as an investigation of three Mexican Institutions

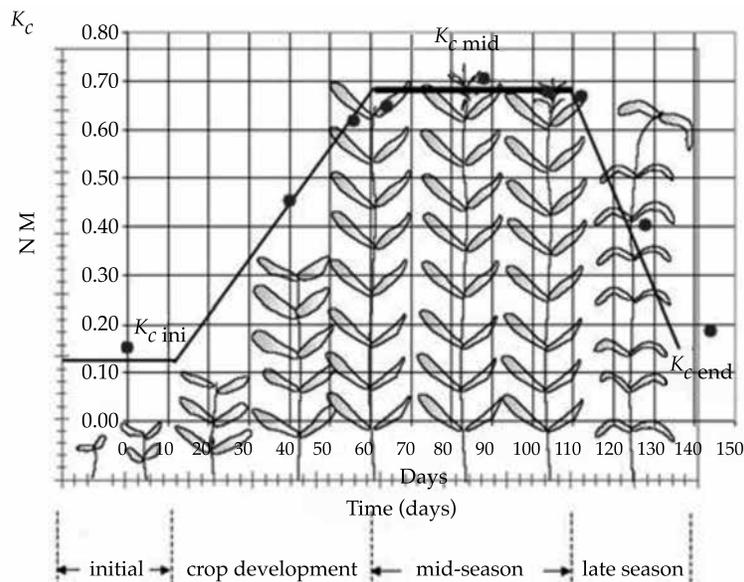


Figure 1. Points represent *NDVI* values obtained from satellite images.

(Colpos, Itson and Uson), with additional support from IRD from France with an experiment to measure evapotranspiration in four blocks of the district, including the use of four Scintillometers.

In such experiment, the crop evapotranspiration of wheat was also measured with Eddy Correlation equipment and *NDVI* indices were calculated, using 10 images from the Landsat 5 satellite. It was obtained similar results as that from Calera and Gonzalez (2007). The relationship is described in an article by Palacios, Palacios and Palacios (2011), whose graph is shown in figure 2.

On the left of the figure, it is shown the variation of  $K_c$  during the growing season of wheat and dark points are the *NDVI* values obtained from 10 images of Landsat 5 and 7 satellites.

The function obtained by Calera and Gonzalez was used to estimate water consumption for all crops, using *ET<sub>r</sub>* information from an automatic weather station. In a WEB page from

the University Castilla la Mancha in Spain, an online system has been developed for DEMETER and PLEIADeS Projects to show the crop conditions and evapotranspiration estimations using this methodology. Now, an improved display is being used in a new project called Sustainable Irrigation water management and River-basin governance: Implementing User-driven Services (SIRIUS).

The online system (viewer), called SPIDER, uses various types of images and geographic information systems, and allows to its users (all members of the consortium SIRIUS, including Mexico), to observe the state of their plots and calculate their water consumption by crops through an ingenious method of graphical integration, using the function (5).

It is considered that this function is only valid for crops that entirely cover the soil surface when they reach flowering. For other perennial crops such as orchards, which generally do not fully cover the ground, is required to calculate other functions. As an example, it can

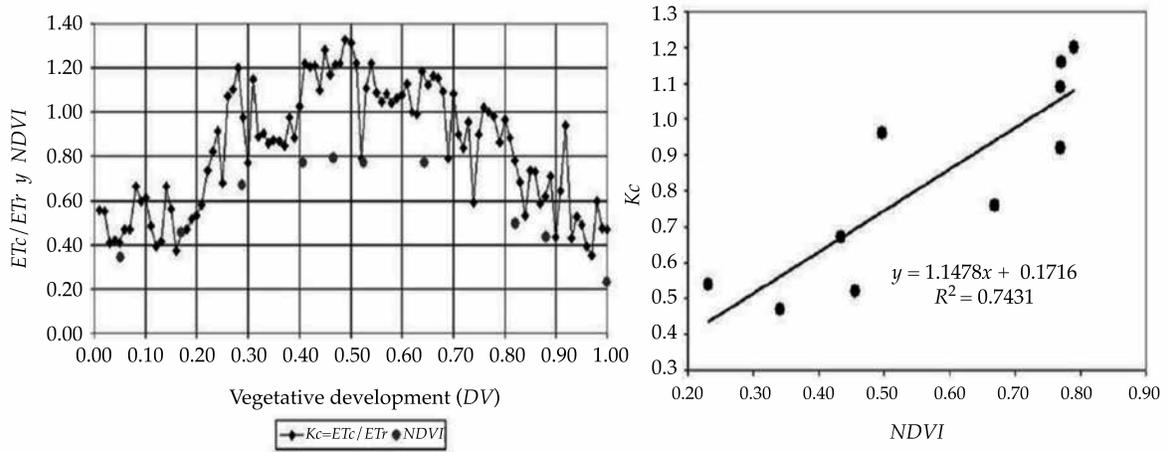


Figure 2. NDVI and  $K_c$  relationship in a wheat crop.

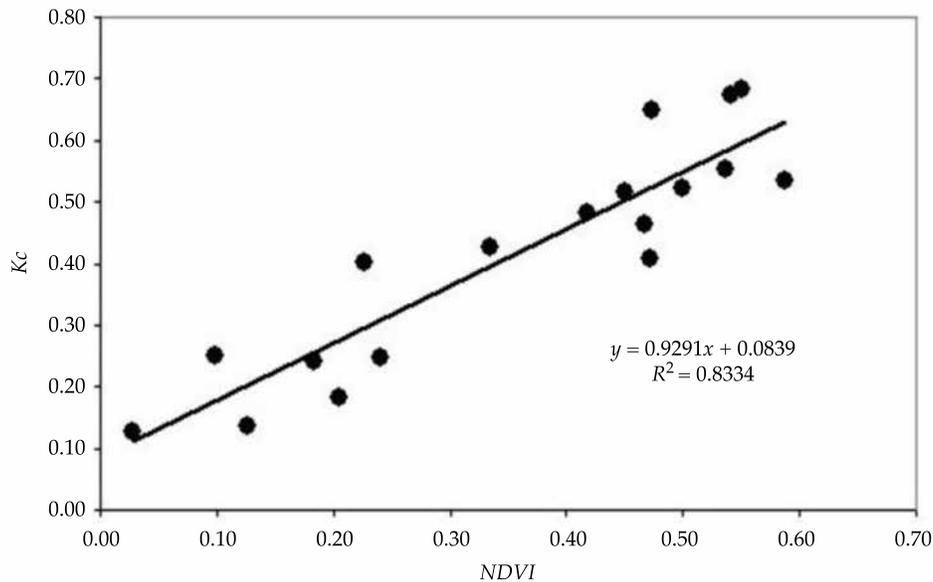


Figure 3. Linear relationship between  $K_c$  and NDVI for table grapes.

be mentioned the function found by Rodriguez, for growing table grapes, presented in an article by Palacios, Palacios, Rodriguez and Palacios (2010). This function obtained in the “Costa de Hermosillo Irrigation District” is shown in figure 3.

Considering that the function (5) can be valid to estimate the annual water consumption of crops that cover the entire irrigated area when reach flowering, then it could be used to calculate water consumption on each plot of an irrigation district.

Under this assumption, then it is possible to integrate the total water consumption by crops in an irrigation district.

## Results

This methodology has been tested in the Rio Mayo irrigation district in the Sonora state, in northern Mexico, where over 95% of the irrigated area is occupied by annual crops, predominantly wheat and safflower. The total water use efficiency in this irrigation district was calculated.

To evaluate the water use efficiency at plot level, software was developed by one of the authors of this report, which allows to calculate the average value of *NDVI* (per pixel) within the perimeter of each plot, using a geographic information system (GIS) of the irrigation district. Subsequently, a database with the average *NDVI* values per plot for each date of the satellite image was generated. Then, using the calculated *ET<sub>r</sub>* of a grass crop by the Penman-Monteith formula and climatic data registered in a weather station situated in the central part of the district, the evaluation of the water consumption in each plot was obtained.

Finally a database with average values of *NDVI* and *ET<sub>c</sub>* per plot was obtained, which allowed evaluating water consumption for irrigation in each module in which the district has been divided. In this area, however, the rain as a source of water during crop development is not significant, therefore the total water use efficiency of the irrigation is achieved by the two sources of irrigation supply for this District, the "Adolfo Ruiz Cortines" dam and 130 deep wells to supplement Irrigation needs.

All this information could be available to the water user associations in the district. To show to any water user who requests information about the status of their plots, it is possible to display satellite pictures with this information on a computer, using the "ArcView®" or other

GIS software such as the open source QGIS. The information is also available on the viewfinder SPIDER Internet, which is located on the web site of the Castilla La Mancha University, [www.zeus.idr-ab.uclm.es/public](http://www.zeus.idr-ab.uclm.es/public). Additionally there is other viewer developed by the doctoral student José Luis Espinosa also available in Internet in:

<http://hidro.colpos.mx:8080/sig-mon/>

In addition, Excel sheets were generated to show the evaluation of the irrigation efficiencies at module level at the irrigation district Río Mayo in the cycle 2015-2016 using Landsat 7 and Landsat 8, shown in the Appendix section of this article.

## Conclusions

It is possible to estimate crop evapotranspiration, at plot level, in Irrigation modules and in Irrigation Districts, using satellite images to calculate the *NDVI* indices and then the crop coefficients *K<sub>c</sub>*. It is also necessary to have climatic data to estimate daily reference evapotranspiration through all the agricultural cycle. In the state of Sonora there is a network of automatic weather stations that can be used to get this climatic data, "Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas de Sonora" (REMAS) [www.siafeson.com/remas/](http://www.siafeson.com/remas/).

To make a growing crop follow-up, such as the one described in the article, it is necessary to obtain satellite images, such as the new Landsat 8. The images of the new Landsat 8 are obtained every 16 days; the images of satellite Sentinel 2A, every 10 days with spatial resolution of 10 meters. Both Landsat 8 and Sentinel 2A have no cost. SPOT satellite images obtained from "Ermex". They are free if provided by means of a government office, or an educational or research institution. The DEIMOS satellite can be another option, it has a spatial resolution of 22 meters, but these images have an approximated cost of 0.15 € per km<sup>2</sup>.

## Appendix

### Río Mayo Irrigation District Agriculture year 2015-2016

Area in hectares and volume in cubic hectometers.

Module	Module area	Cropped area	Volume extrac.	Vol.To module	Conv. losses	Conv. Effic.	Etc volume	Irrig. losses	Irrig. efficiency
1	8 030	7 481	62 217	40,720	21 497	0.65	32 903	7 817	0.81
2	8 808	9 057	81 669	53,452	28 218	0.65	42 917	10 534	0.80
3	5 256	5 422	51 060	33,418	17 642	0.65	26 608	6 810	0.80
4	5 803	4 859	45 165	29 560	15 605	0.65	21 326	8 234	0.72
5	5 169	3 992	33 050	21 631	11 419	0.65	16 186	5 445	0.75
6	7 901	7 284	61 093	39 985	21 108	0.65	31 089	8 896	0.78
7	8 138	8 712	81 062	53 054	28 008	0.65	46 784	6 270	0.88
8	3 606	3 081	35 938	23 521	12 417	0.65	14 792	8 729	0.63
9	6 073	7 032	65 605	42 938	22 667	0.65	34 201	8 736	0.80
10	5 004	5 179	46 733	30 586	16 147	0.65	25 928	4 658	0.85
11	5 122	5 075	44 011	28 805	15 206	0.65	26 934	1 870	0.94
12	6 887	6 400	58 693	38 414	20 279	0.65	29 851	8 562	0.78
13	6 570	6 202	54 841	35 893	18 948	0.65	32 135	3 758	0.90
14	4 687	4 833	45 101	29 518	15 583	0.65	20 747	8 771	0.70
15	6 040	5 804	55 532	36 345	19 187	0.65	30 838	5 507	0.85
16	3 981	2 252	21 629	14 156	7 473	0.65	8 380	5 777	0.59
	97 074	92 664	843 400	551 995	291 405	0.65	441 620	110 375	0.80
		<b>Water losses</b>	<b>Volume</b>	<b>% losses</b>	<b>Efficiency (%)</b>	<b>Note: The apparent high values of irrigation efficiency observed in some modules could be to the use of water which was reported as conveyance losses</b>			
		From dam-Tesia	68 600	14.6	97.7				
		Canal losses	291 405	62.0	65.5				
		Irrigation losses	110 375	23.5	80.0				
		Total losses	470 380	100.0	51.1				
		From Dam	824 000						
Withdrawal		From wells	88 000						
		Total	912 000						

## References

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. Rome: UN-FAO.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Smith, M., Raes, D., & Wright, J. L. (2005). The FAO-56 dual crop coefficient method for predicting evaporation from soil and application extensions. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 131, 2-13.
- Calera, A., & González, J. (2007). *Parámetros biofísicos de la cubierta vegetal. Relaciones operativas para la obtención de mapas de estos parámetros de las imágenes de satélite*. Documento de PLEIADeS. Albacete, España: Grupo de Teledetección y SIG, IDR, UCLM.
- D'urso, G., & Calera-Belmonte, A. (2006). Operative approaches to determine crop water requirements from Earth Observation data: Methodologies and applications (pp. 14-25). In: *AIP Conference Proceedings 8S2: Earth*

*Observation for Vegetation and Water Management*, Naples, Italy, November, 10-11, 2005.

Palacios, E. (2002). *¿Por qué, cuando, cuánto y cómo regar?: para lograr mejores cosechas*. México, DF: Editorial Trillas.

Palacios, E., Palacios, L. S., Rodríguez, J. C., & Palacios, J. E. (2010). Earth Observation as a support to improve water use in irrigated agriculture. *Journal of Agriculture Science and Technology*, 4(6), 1-9.

Palacios, E., Palacios, L. S., & Palacios, J. E. (2011). *Agricultura de riego asistida con satélites*. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(2), 69-81.

Palacios, E., & Flores, H. (2013). Crop evapotranspiration estimation through the use of satellite images. *Journal of Earth Science and Engineering*, 3(2013), 663-671.

Rosenberg, N. J. (1974). *Microclimate: The biological environment*. New York: John Wiley & Sons.

## Institutional address of the authors

Ph.D. Enrique Palacios-Vélez  
M.C. José L. Espinosa-Espinosa

Colegio de Postgraduados  
Hidrociencias Department  
Carretera México-Texcoco km 36.5  
56230 Mexico State, MEXICO  
epalacio@colpos.mx  
espinosa.jose@colpos.mx

Ph.D. Luis A. Palacios-Sánchez

Servicios de Estudios en Ingeniería y Sistemas,  
S. A. de C. V.  
Tezozmoc 55, Fraccionamiento Cuauhtémoc  
83294 Hermosillo, Sonora, MEXICO  
luispalacios@seissa.com.mx

# Variaciones espacio-temporales y modelaje de la concentración de oxígeno disuelto en el lago de Chapala, México

• Celia de-la-Mora-Orozco • José Germán Flores-Garnica\* •  
• Hugo Ernesto Flores-López •

*Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias,  
Tepatlán de Morelos, México*

\*Autor para correspondencia

• Héctor Osbaldo Rubio-Arias •

*Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México*

• Álvaro Agustín Chávez-Durán • Jesús Manuel Ochoa-Rivero •

*Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias,  
Tepatlán de Morelos, México*

• Javier García-Velasco •

*Universidad de Guadalajara, Zapopan, México*

DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-03

## Resumen

De la Mora-Orozco, C., Flores-Garnica, J. G., Flores-López, H. E., Rubio-Arias, H. O., Chávez-Durán, A. A., Ochoa-Rivero, J. M., & García-Velasco, J. (enero-febrero, 2018). Variaciones espacio-temporales y modelaje de la concentración de oxígeno disuelto en el lago de Chapala, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(1), 39-52, DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-03.

La disminución del oxígeno disuelto (OD) en ecosistemas acuáticos alrededor del mundo ha afectado su calidad. El objetivo fue estimar la variación espacio-temporal del OD en el agua del lago de Chapala, México. Fueron seleccionados 16 sitios ( $n = 16$ ) y en cada uno se cuantificó la concentración de OD *in situ* a cinco profundidades; en la superficie, y a 1, 2, 3 y 4 m. Las fechas de cuantificación fueron en septiembre, octubre, diciembre, febrero y junio (1996-1997). La información se analizó con la técnica geoestadística de Kriging ordinario, cuyo primer resultado son los variogramas. Los resultados indicaron que en diciembre, febrero y junio, los niveles de OD fueron superiores a 5 mg l<sup>-1</sup>; mientras que en octubre, en la parte sureste del lago, se observaron concentraciones inferiores a 3 mg l<sup>-1</sup>. Los resultados mostraron que fue posible modelar la variación espacio-temporal de OD tanto a lo largo del lago de Chapala como a diferentes profundidades. Sin embargo, se observó que en algunos casos los variogramas presentaron una tendencia espacial a nivel global, por lo que, en futuros trabajos, se sugiere modelar con base en Kriging universal o utilizando otros modelos de interpolación.

**Palabras clave:** interpolación, Kriging ordinario, contaminación, geoestadística, estimación estocástica.

## Abstract

De la Mora-Orozco, C., Flores-Garnica, J. G., Flores-López, H. E., Rubio-Arias, H. O., Chávez-Durán, A. A., Ochoa-Rivero, J. M., & García-Velasco, J. (January-February, 2018). Spatial and temporal variations and modelling of dissolved oxygen concentration in Chapala Lake, Mexico. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 9(1), 39-52, DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-03.

In various parts of the world, the decrease in dissolved oxygen (DO) in the lakes has affected negatively their quality. In Mexico, the Chapala Lake is the most important water body, since it has a transcendental role in the productive development of the region. Nevertheless, is also one of the most polluted bodies of water, therefore, the monitoring of the water quality is an important issue for its management. However, time and cost, involved in a constant sampling, are some of the main limitations for such monitoring. Therefore, we used alternative methodologies based on geostatistical approaches. In this way, we studied the OD spatial-temporal continuity of OD, through interpolations defined with ordinary kriging. The results showed that it was possible to model the variation spatial-temporal of OD concentrations, both along the Lake of Chapala, as at different depths. However, in some cases, the variograms presented a spatial trend at a global level. Therefore, in future work, we suggest to modeling OD based on universal kriging.

**Keywords:** Interpolation, ordinary kriging, contamination, geostatistics, stochastic estimation.

Recibido: 19/01/2017

Aceptado: 17/07/2017

## Introducción

El oxígeno disuelto (OD) es uno de los parámetros más importantes en la estimación de la calidad del agua en un ecosistema y representa un factor determinante para la biodiversidad. La determinación del OD se utiliza como un indicador para conocer el estado de salud de un ecosistema acuático (USGS, 2013; Zhang *et al.*, 2015; Null, Mouzon, & Elmore, 2017). El agua debe contener una concentración mínima de 3.0 mg l<sup>-1</sup> para la sobrevivencia de la biota (Iriando & Mota, 2004), pero un nivel de 8.0 mg l<sup>-1</sup> representa un agua sobresaturada. De hecho, concentraciones constantes mayores de 5.0 mg l<sup>-1</sup> pueden poner en riesgo la salud del ecosistema (Rizo & Andreo, 2016). Sin embargo, algunos procesos físicos, biológicos y químicos pueden alterar la concentración de OD en un ecosistema acuático (Nakova, Linnebank, Bredeweg, Salles, & Uzunov, 2009; Heddam, 2014). Los factores antrópicos modifican estos procesos al introducir desechos orgánicos (Lai & Lam, 2008; Wu, Wen, Zhou, & Wu, 2014). Uno de los efectos negativos de la presencia de desechos orgánicos es el crecimiento excesivo de algas (De la Mora, Flores, Ruíz, & García, 2004). En diversas partes del mundo se ha observado el crecimiento de algas que bajo ciertas condiciones generadas por el impacto de la actividad antrópica (descarga excesiva de nutrientes) pueden proliferar cianobacterias que poseen cepas tóxicas para algunos organismos, como los mamíferos (Zhai, Yang, & Hu, 2009). La presencia de materia orgánica en agua disminuye de manera importante la concentración de oxígeno, ya que requiere del mismo para su degradación. Como consecuencia, se puede provocar la muerte de microorganismos (Yuan & Pollard, 2015), además de ocasionar alteraciones importantes en la estructura de las comunidades acuáticas y su distribución (Wetzel, 2001; De Jonge, Elliott, & Orive, 2002; Singaraja *et al.*, 2011). Por estos antecedentes, el OD se ha identificado como la primera causa o razón más común de la degradación de la calidad del agua. Tan sólo en los Estados Unidos de Norteamérica

la disminución del OD ha afectado de manera negativa la calidad de 1.4 millones de acres en lagos (Yuan & Pollard, 2015).

En México, el lago de Chapala es el más grande y es calificado como uno de los cuerpos de agua más importantes, con una superficie de 1 161 km<sup>2</sup>, capacidad máxima de 9 686 Mm<sup>3</sup>, dimensiones de 70 km de largo y 15 km de ancho. Es un lago tropical, somero y turbio; la profundidad promedio durante 1934 y 2003 fue de 4.86 m (Hansen & Van Afferden, 2004a). Este reservorio acuático forma parte de la cuenca hidrológica Lerma-Chapala y tiene un papel trascendental en el desarrollo productivo de la región (Mestre, 2011). Este lago es la principal fuente de abastecimiento de agua potable para cerca de 1.6 millones de habitantes de la ciudad de Guadalajara, en el estado de Jalisco (Hansen & Van Afferden, 2004a). A pesar de ser el vaso receptor de los escurrimientos de la cuenca, los aportes hídricos se han reducido de manera importante en las últimas décadas y, por otra parte, la demanda de agua se ha incrementado (Hansen & Van Afferden, 2004b). En la cuenca del Lerma, los principales contaminantes provienen de la industria farmacéutica, de alimentos y destilerías, entre otras. Además, se estima que las descargas de los municipios establecidos a lo largo del Lerma-Chapala generan un aproximado de 130 500 t año<sup>-1</sup> de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y alrededor de 424 260 t año<sup>-1</sup> de demanda química de oxígeno (DQO). Es importante mencionar que un gran porcentaje de estas descargas llega al lago sin previo tratamiento, lo cual ha intensificado los problemas de calidad, reduciendo de manera importante la disponibilidad del recurso agua (Sedeño & López, 2007). Los desechos que aportan la industria y las zonas urbanas son ricas en nutrientes, que magnifican la condición de eutrofización; es decir, se favorece la producción de plancton, y el florecimiento de algas y macrófitas (Rosales, Carranza, & López, 2000). Además de los procesos químicos y biológicos que influyen en la concentración del OD en un cuerpo de agua (Bai *et al.*, 2016; Null *et al.*, 2017), también las condiciones ambientales, como

temperatura del agua y ambiental (Paéz, Alfaro, Cortés, & Segovia, 2013); profundidad (Beltrán, Ramírez, & Sánchez, 2012); presión atmosférica y vientos son importantes. Null *et al.* (2017) señalan que altas temperaturas disminuyen la presencia de OD, como consecuencia se genera una fragmentación de los ecosistemas acuáticos y se limitan las poblaciones nativas de peces.

En el caso del lago de Chapala, la cantidad y calidad del agua que entra del río Lerma como principal afluente de agua al lago, los eventos meteorológicos, profundidad y temperatura, desechos urbanos arrastrados al ecosistema de poblaciones aledañas, escorrentías de zonas agrícolas y, en general, de la cuenca hidrológica, influyen en la concentración y distribución del OD. También se ha sugerido que el lago funciona como un sistema mezclado respecto a la calidad del agua, donde existe una relación entre el volumen de agua y la calidad de la misma (Hansen & Van Afferden, 2004a). Lind y Dávalos (2001) mencionan que la acción del viento, los niveles de agua y la dilución provocada por la lluvia son los factores que explican el proceso de mezclado en el lago. Desde hace cuatro décadas se documentó información del nivel de contaminación del lago de Chapala y su potencial efecto negativo en el ecosistema. La concentración promedio anual de los niveles de OD hace 30 años se encontraba muy por encima de lo recomendado para una vida ecológica sana (Paré, 1989). En un estudio más reciente desarrollado en el lago de Chapala se documentaron niveles de OD en un rango de 7.18 a 9.88 mg l<sup>-1</sup> (Trujillo *et al.*, 2010).

Un monitoreo dinámico y la evaluación de la concentración de OD en el lago de Chapala no sería suficiente para sugerir estrategias de manejo, pues se debe considerar también su variación espacial. De acuerdo con lo anterior, el objetivo de esta investigación fue estimar y modelar la variación espacio-temporal del oxígeno disuelto en el agua del lago de Chapala, México.

### Variabilidad espacial

El modelaje de la variación espacial de un fenómeno dado se hace a través de una técnica de

interpolación, como Kriging ordinario (KO), con base en la cual se generan las superficies continuas correspondientes (Burrough & McDonnell, 1998). Esta técnica es considerada como el “mejor estimador lineal insesgado” (Olea, 1991), que representa una ventaja sobre otras técnicas de interpolación, como la de distancia inversa ponderada o los polígonos de Thiessen (Isaaks & Srivastava, 1989). Kriging ordinario puede ser calculado usando la fórmula siguiente (Flores & Moreno, 2005):

$$\tilde{Z}_{OK}(x_o) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(x_i) \quad (1)$$

Donde  $\tilde{Z}$  es el valor estimado de oxígeno disuelto en el punto de muestreo determinado,  $\lambda_i$  la ponderación para el punto de muestreo  $i$  en el sitio  $x_i$ , la cual se obtiene integrando la distancia inversa al punto a estimar, y al grado de agrupamiento (covarianza) de los puntos base de la estimación;  $Z(x_i)$  es el valor de la variable  $Z$  (en este caso oxígeno), para el punto de muestreo  $i$ , en el sitio  $x_i$ ,  $n$  = número de puntos de muestreo. La varianza de KO fue calculada con la fórmula siguiente:

$$\sigma_{OK}^2(x_o) = C(x_o, x_o) - \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot C(x_i, x_o) + \mu \quad (2)$$

donde  $\sigma_{OK}^2(x_o)$  es la varianza del oxígeno disuelto estimado en un punto determinado;  $C(x_o, x_o)$  es la covarianza del punto a estimar en el sitio  $x_o$  con sí mismo;  $C(x_i, x_o)$  es la covarianza de un punto de muestro en el sitio  $x_i$  y el punto a estimar en el sitio  $x_o$ .

### Modelaje de la continuidad espacial

Para poder modelar la continuidad espacial de un fenómeno dado, KO requiera que se defina, a través de un variograma, la tendencia de la variabilidad de los valores de un punto muestreado en relación con otros puntos muestreados a diferentes distancias. Para esto se deben especificar los valores que definen un variograma: rango, *nugget* y *sill*. El rango se ubica donde los valores del variograma tienden a estabilizarse, mientras que el parámetro *sill* es el valor del

variograma para distancias grandes (Isaaks & Srivastava, 1989), y el *nugget*, o efecto *nugget*, define una discontinuidad en el origen (Samra, Gill, & Bhatia, 1989). En forma adicional, se presenta la proporción de la estructura espacial (PEE), que es un estadístico que indica la proporción de la varianza de la muestra (*sill*) explicada por la varianza espacialmente estructurada (*sill-nugget*). De esta forma, PEE se calcula al dividir (*sill-nugget*)/(*sill*).

### Validación de las estimaciones

La validación cruzada se utiliza para comparar los resultados del uso de diferentes técnicas de interpolación (Goovaerts, 1997), lo cual se basa en un análisis de correlación entre los valores reales y los valores estimados, con lo que se definen el error estándar (EE) de la predicción y el coeficiente de determinación. De esta forma, mientras más grande sea el EE de estimación, mayor será la dispersión de los puntos alrededor de la línea de regresión. Por el contrario, si el EE tiende a ser cero, se espera que la interpolación sea más precisa (Flores & Moreno, 2005).

### Materiales y métodos

Se seleccionaron 16 sitios ( $N = 16$ ) en toda el área del lago de Chapala, con el apoyo del Instituto de Limnología de la Universidad de Guadalajara (figura 1). En cada sitio se cuantificó *in situ* la concentración del OD en cinco secciones; en la superficie, y a 1, 2, 3 y 4 m de profundidad. Se utilizaron 4 m como la profundidad máxima en este estudio, ya que la profundidad promedio de 1934 a 2003 fue de 4.86 m (Hansen & Van Afferden, 2004a), además se contaba con los datos homogéneos necesarios para realizar el modelo. Los datos que se utilizaron en este trabajo se obtuvieron en 1996-1997, en los meses de septiembre, octubre, diciembre, febrero y junio, que cubren la variabilidad estacional de lluvias, estival, y caudal. En el mes de septiembre se capta la mayor cantidad de agua proveniente del río Lerma, mientras que en octubre se presenta la mayor escorrentía proveniente de

la precipitación pluvial. En diciembre disminuyen los caudales, y se observa crecimiento de algas cianofíceas y clorofíceas. En febrero disminuyen las entradas al lago, mientras que junio representa el final de la época estival, con niveles mínimos de agua como respuesta de poca entrada y grandes extracciones para la agricultura y uso urbano.

### Obtención de datos de OD

La recolección de datos fue realizada por personal calificado del Instituto de Limnología de la Universidad de Guadalajara, utilizando el método electrométrico. Para este análisis se utilizó un equipo portátil que contiene un electrodo de vidrio multiparámetro YSI Modelo 85, el cual fue debidamente calibrado por el personal encargado del muestreo.

### Modelaje de la variación espacial

Para determinar la variación espacial de la disponibilidad de oxígeno en las diferentes épocas y profundidades se utilizó la técnica de interpolación conocida como Kriging ordinario (KO) para generar las superficies continuas correspondientes (Burrough & McDonnell, 1998). Asimismo, se obtuvieron los errores estándares correspondientes a cada fecha de muestreo. De esta forma, la variación fue definida a través de variogramas anisotrópicos (resumen del comportamiento bivariado de una función al azar estacionaria), que resultaron en cada muestreo (por época y profundidad). De acuerdo con esto, se desarrollaron los variogramas experimentales para cada fecha de muestreo, los cuales se usaron para modelar la correlación espacial entre las concentraciones de oxígeno (Armstrong, 1998; Czaplewski, Reich, & Bechtold, 1994). La variación espacial definida por cada variograma experimental fue modelada con base en el variograma teórico que mejor definiera la continuidad espacial de los datos. Esto, con el propósito de estimar los valores de varianza en las distancias que no son cubiertas por el variograma experimental (Flores & Moreno, 2005).

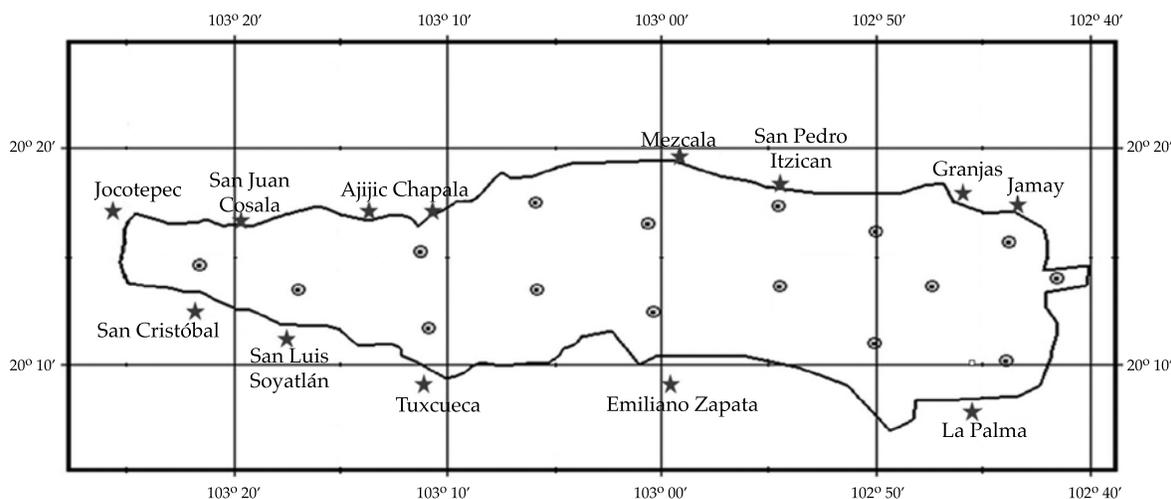


Figura 1. Ubicación de los 16 sitios para el muestreo de datos de oxígeno disuelto en el lago de Chapala.

### Criterio de validación

Para comparar las interpolaciones entre diferentes épocas y profundidades se usó la técnica de validación cruzada (Goovaerts, 1997), que consiste en remover el valor muestreado de un sitio en particular, después de lo cual su valor es estimado con base en los restantes sitios (Isaaks & Srivastava, 1989). Esto se repite para cada sitio y después se comparan los valores reales e interpolados, y las diferencias son referidas como residuales o errores (Flores & Moreno, 2005). Un análisis de correlación entre los valores reales y los valores estimados permitió evaluar la precisión de las interpolaciones a través del error estándar (EE) de la predicción y el coeficiente de determinación. El EE permite ponderar la confiabilidad de la ecuación de regresión, que se define al correlacionar los valores reales con los estimados, ya que mide la variabilidad, o dispersión, de los valores observados alrededor de la línea de regresión.

### Resultados

Un primer análisis de los datos permitió definir si el nivel de OD a lo largo del lago de Chapala era suficiente para sostener la biodiversidad

del ecosistema, en especial la de los peces. En general, se considera que una concentración de  $5 \text{ mg l}^{-1}$  es adecuada para este propósito, pero si se presentan concentraciones menores a  $3 \text{ mg l}^{-1}$  puede ser letal para la fauna (Iriando & Mota, 2004; Rizo & Andreo, 2016). En la figura 2 se muestran las variaciones de OD, donde la malla representa la ecuación de regresión resultante al considerar la ubicación (longitud (X), latitud (Y)) y la profundidad como variables independientes. Con excepción de los muestreos de septiembre y octubre, el promedio de OD fue mayor a  $5 \text{ mg l}^{-1}$ , observándose la mejor disponibilidad en febrero, seguido de diciembre. Por el contrario, en octubre, la porción suroeste del lago presenta concentraciones incluso menores a  $3 \text{ mg l}^{-1}$ , lo cual, como se señaló anteriormente, puede afectar la presencia de peces en el área. Las ecuaciones correspondientes a las regresiones de la figura 2 se presentan en el cuadro 1. Se remarca que la más alta correlación se obtuvo para junio y la más baja para diciembre. En general, la profundidad fue la variable más significativa ( $p < 0.05$ ) en la estimación de la concentración de OD, con excepción de octubre, donde ambas coordenadas predijeron mejor la concentración, en comparación con la profundidad. En el caso

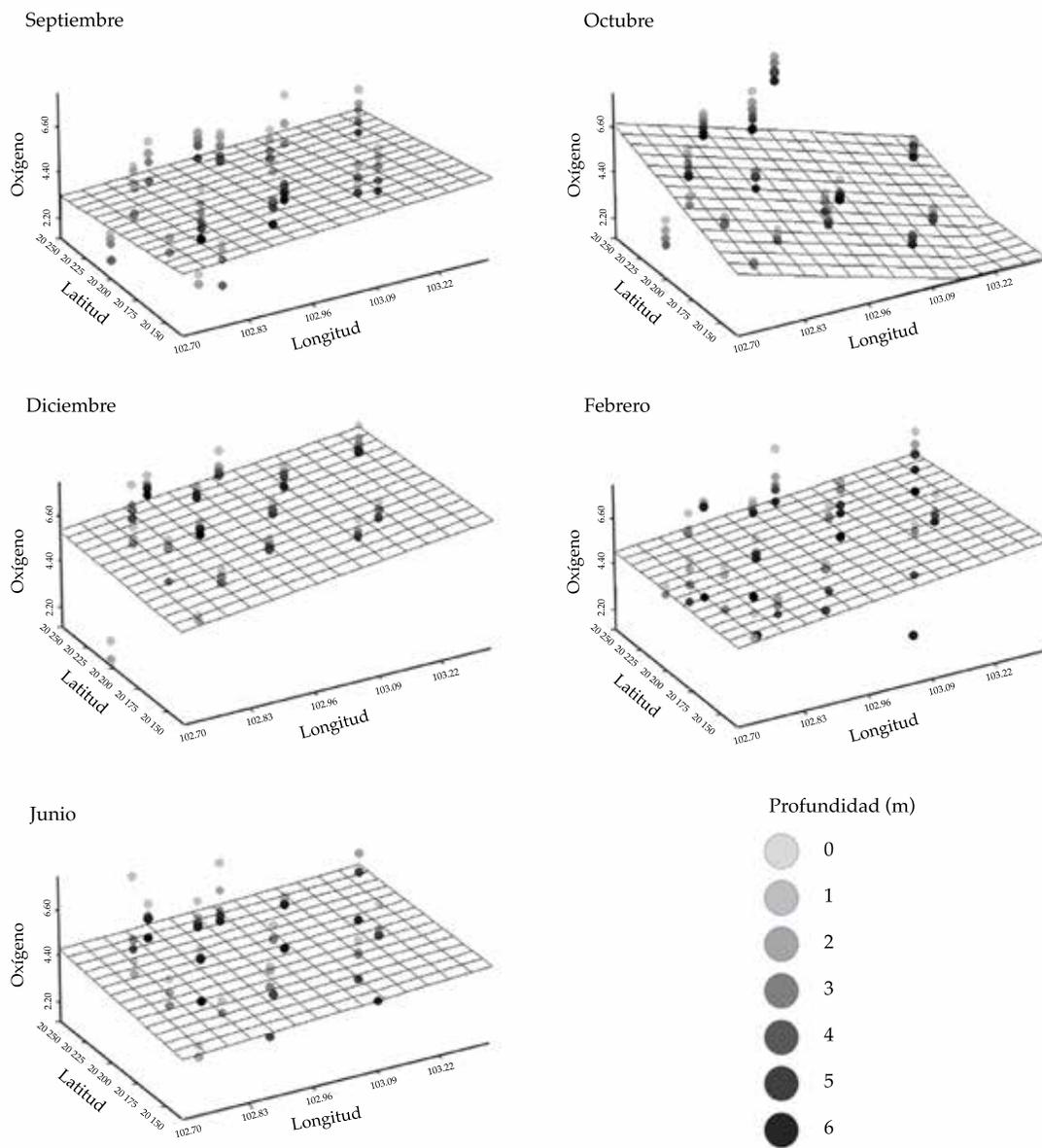


Figura 2. Modelaje de la variación espacial de las concentraciones de OD a diferentes profundidades en el lago de Chapala.

Cuadro 1. Ecuaciones y estadísticos que corresponden a la regresión entre oxígeno y profundidad para el lago de Chapala.

Época	Modelo	r <sup>2</sup>	Pr(F) de X	Pr(F) de Y	Pr(F) de P
Septiembre	O = -115.2704 - 1.882943(X) - 3.639218(Y) + 0.5654791(P)	0.4256	0.154	0.0775	0.0000
Octubre	O = -70.1952 + 3.7019(X) + 22.5058(Y) + 0.1851(P)	0.4356	0.0000	0.0000	0.0345
Diciembre	O = -635.7797 - 3.1648(X) + 15.6688(Y) + 0.7597(P)	0.2018	0.0005	0.1555	0.0506
Febrero	O = -423.422 - 2.7406(X) + 7.2775(Y) + 0.1805(P)	0.3495	0.0503	0.0898	0.0000
Junio	O = -483.7652 - 3.4889(X) + 6.4927(Y) + 0.7616(P)	0.5893	0.0004	0.6669	0.0000

O = oxígeno (mg/l)

X = coordenadas longitud (grados)

Y = coordenadas latitud (grados)

P = profundidad (m)

de diciembre, sólo la longitud (X) fue más significativa que la profundidad.

### Modelaje de la continuidad espacial

En el cuadro 2 se indican los modelos (esférico, lineal y exponencial) que se ajustaron a cada variograma (figura 3), así como los tres parámetros que definen su estructura, rango *nugget* y *sill*. En general, los resultados fueron similares, con excepción de los variogramas que corresponden a las profundidades de 3 y 4 m, en septiembre, y la profundidad de 3 m en febrero, cuyo valor de PEE fue igual a cero. Este resultado implica que la variabilidad espacial de la concentración de OD es explicada por la varianza de la muestra. Con base en estos variogramas se generaron los mapas que plasman las variaciones espacio temporales del OD, las cuales son analizadas más adelante (generación de superficies continuas).

Por otra parte, el ajuste de los modelos varió desde una  $r^2$  de 0.00 hasta 0.966, lo cual puede ser explicado por el número bajo de puntos de muestreo. Sin embargo, si no se cuenta con información *a priori*, y se busca encontrar el modelo que mejor se ajuste al variograma experimental, el criterio de  $r^2$  es adecuado (Gallardo, 2006). No obstante, se prefiere usar el cuadrado de residuales (SCR) como criterio de selección, el cual representa una medida más robusta del ajuste a los datos del variograma, por lo que de acuerdo con este parámetro se encontraron los mejores resultados en los meses de octubre y junio.

Los resultados obtenidos durante el proceso de modelaje (cuadro 2) muestran que las proporciones más homogéneas en la explicación de la varianza ( $r^2$ ) corresponden a los modelos de los datos de octubre y junio. Sin embargo, el mejor ajuste ( $r = 0.96$ ) se observó para los

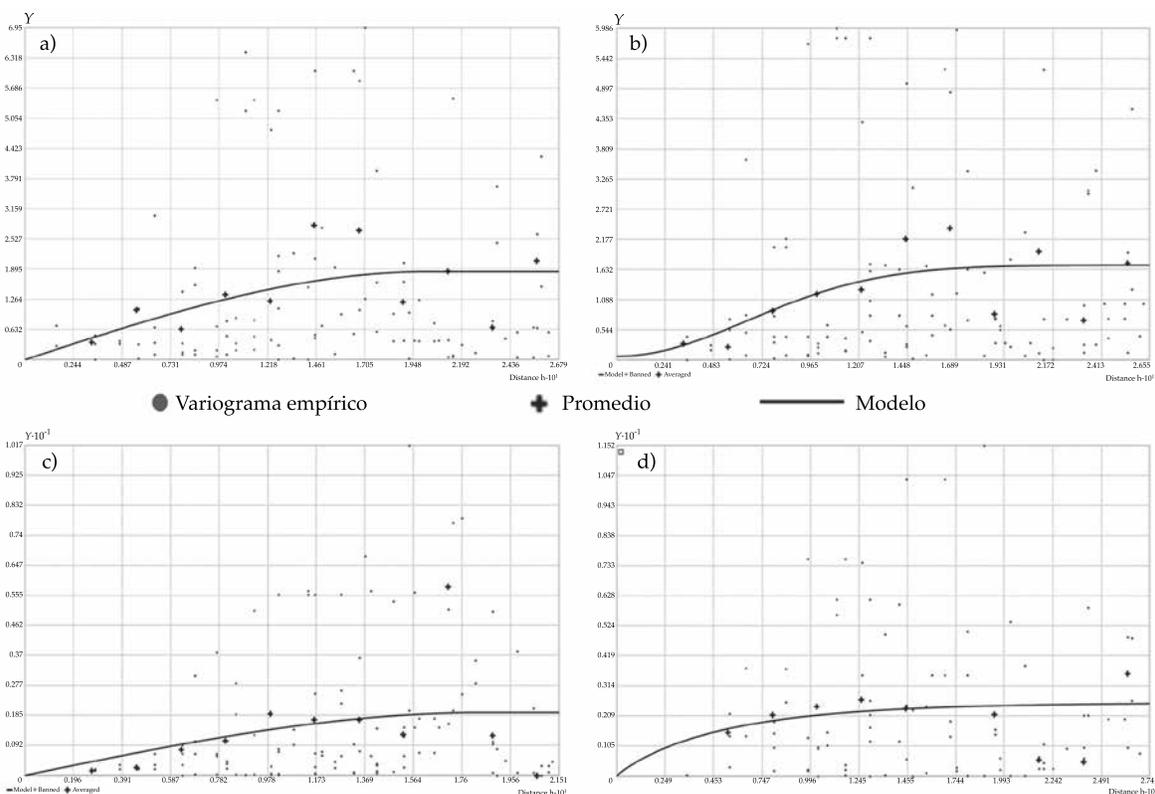


Figura 3. Variogramas de las concentraciones de OD en el lago de Chapala correspondientes al mes de septiembre para diferentes profundidades: a) superficie, modelo esférico; b) 1 m, modelo lineal; c) 2 m, modelo esférico; d) 3 m, modelo lineal.

Cuadro 2. Parámetros y estadísticos de los modelos ajustados a los variogramas de la concentración de oxígeno en el lago de Chapala.

Época	Nivel	Modelo	Nugget	Sill	Rango	PEE	R <sup>2</sup> del modelo del variograma	Validación cruzada		
								SCR	r <sup>2</sup>	EEP
Septiembre	Superficie	Esférico	0.087	1.761	0.239	0.951	0.162	4.660	0.065	1.110
	-1	Linear	1.367	1.413	0.463	0.032	0.000	4.070	0.735	0.559
	-2	Esférico	0.174	1.494	0.163	0.884	0.055	5.460	0.042	1.104
	-3	Linear	2.307	2.307	0.452	0.000	0.738	7.620	0.960	0.326
	-4	Linear	1.061	1.061	0.285	0.000	0.141	0.251	0.873	0.353
Octubre	Superficie	Esférico	0.065	3.145	0.290	0.979	0.601	2.480	0.566	1.045
	-1	Esférico	0.395	3.410	0.313	0.884	0.512	3.820	0.455	1.221
	-2	Esférico	0.620	3.448	0.299	0.820	0.464	3.860	0.441	1.259
	-3	Esférico	1.158	4.035	0.348	0.713	0.839	0.452	0.393	1.363
	-4	Esférico	1.900	7.809	0.609	0.757	0.966	0.148	0.360	1.657
Diciembre	Superficie	Esférico	0.250	6.686	1.059	0.963	0.116	69.000	0.121	1.251
	-1	Esférico	0.320	7.760	1.046	0.959	0.111	98.300	0.105	1.360
	-2	Exponencial	0.360	16.150	1.108	0.978	0.120	135.000	0.054	1.507
	-3	Esférico	0.010	3.245	0.324	0.997	0.331	21.500	0.000	1.657
	-4	Exponencial	0.006	0.317	0.811	0.981	0.531	0.002	0.470	0.202
Febrero	Superficie	Esférico	1.560	16.530	1.062	0.906	0.116	369.000	0.163	2.099
	-1	Esférico	0.010	12.320	1.071	0.999	0.170	181.000	0.332	1.427
	-2	Esférico	0.700	7.871	1.281	0.911	0.224	47.700	0.111	1.576
	-3	Linear	2.723	2.723	0.285	0.000	0.220	6.270	0.960	0.334
	-4	Esférico	0.826	3.957	0.273	0.791	0.058	32.700	0.206	1.941
Junio	Superficie	Linear	0.001	3.011	0.945	1.000	0.405	2.400	0.498	0.592
	-1	Linear	0.001	2.011	0.846	1.000	0.709	0.584	0.568	0.468
	-2	Esférico	0.272	2.033	1.143	0.866	0.568	0.753	0.067	0.503
	-3	Esférico	0.910	5.854	0.620	0.845	0.595	1.940	0.079	1.772
	-4	Esférico	2.401	4.803	0.768	0.500	0.362	0.767	0.283	1.378

PEE Proporción de la estructura espacial

SCR Suma del cuadrado de los residuales

EEP error estándar de la predicción

modelos a una profundidad de 3 m en febrero y septiembre. En cuanto al error estándar de la predicción (EEP), en general fue similar en todos los modelos. En forma particular, los valores menores de EEP corresponden a los modelos a una profundidad 3 y 4 m (septiembre), 4 m (diciembre) y 3 m (febrero).

### Generación de superficies continuas

Con base en los modelos obtenidos para cada fecha y profundidad (cuadro 2) se definieron las superficies continuas correspondientes que

se ejemplifican en la figura 4, donde se puede observar cómo fue la variación espacial OD en el lago de Chapala. En general, las concentraciones menores se presentaron en septiembre y octubre; sin embargo, la variación espacial fue similar entre las diferentes profundidades en octubre, mientras que la concentración mayor correspondió a febrero. En octubre se notaron las mayores concentraciones en las partes centro y este del lago, siendo similar en todas las profundidades.

Con respecto a diciembre, las concentraciones fueron más bien similares en todas las

profundidades, con una ligera variación a nivel de la superficie. La concentración mayor de OD se presentó en la parte centro sur del lago, en todas las profundidades, con excepción de la profundidad a los 4 m, donde se observó

una baja concentración de oxígeno. La mayor concentración se ubicó en la superficie, la cual fue disminuyendo ligeramente en los extremos este y oeste del lago a medida que aumentaba la profundidad. En febrero se presentó una menor

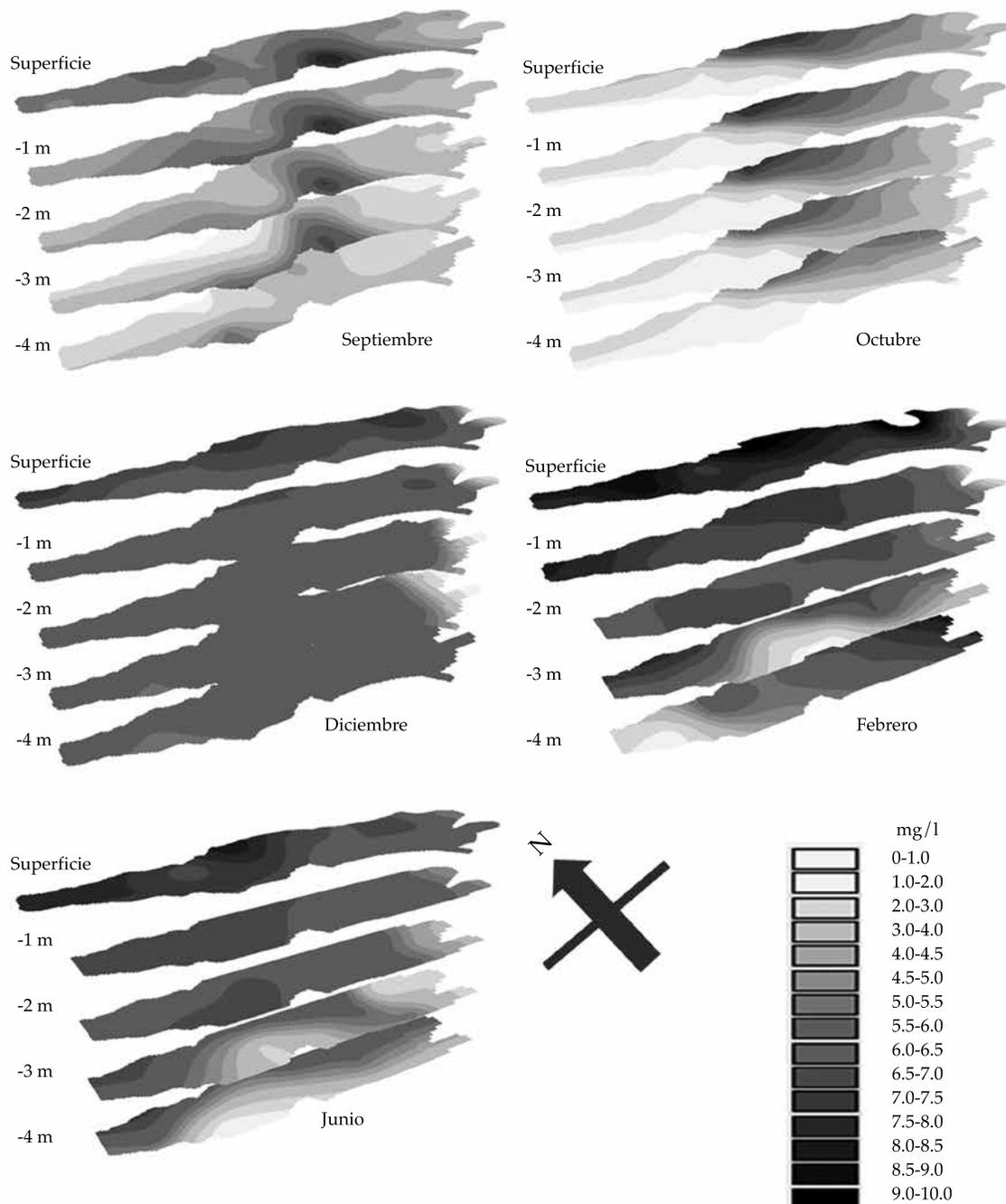


Figura 4. Variación espacial de las concentraciones de OD en el lago de Chapala a diferentes profundidades, que corresponde a cada fecha de muestreo.

concentración al nivel de 3 m de profundidad, que iba aumentando a medida que la profundidad disminuía, observándose las mayores concentraciones en la parte norte del lago. Finalmente, en junio, aunque en concentraciones más bajas, los valores mayores se ubicaron en la parte norte del lago, observándose variaciones notables en las diferentes profundidades.

### Modelos de correlación

Las ecuaciones correspondientes a las regresiones de la figura 2 se presentan en el cuadro 1. Es notorio que la más alta correlación se obtuvo para junio, siendo la más baja la de diciembre. En general, la profundidad fue la variable más significativa ( $p < 0.05$ ) en la estimación de la concentración de OD, con excepción de octubre, donde ambas coordenadas predijeron mejor la concentración, en comparación con la profundidad. En el caso de diciembre, sólo la longitud (X) fue más significativa que la profundidad.

### Discusión

Es importante señalar que a pesar de sus bondades, el uso de la técnica de Kriging ordinario no garantiza los mejores resultados en una interpolación (Flores & Moreno, 2005). Es decir, no es posible definir una sola técnica de interpolación que resulte en mejores estimaciones en todos los casos; no obstante, la técnica de Kriging ha detectado mínimos errores en algunos estudios comparativos, por lo que se ha considerado la más adecuada (Dodd, Mechant, Rayner, & Morrice, 2015). Es importante también especificar que la autocorrelación espacial de un parámetro está definida por varios factores, como la intensidad de muestreo, la escala, la distribución de los sitios de muestreo y las diferencias entre los valores vecinales (Flores & Moreno, 2005). Esto implica que en un estudio de este tipo podría probarse más de una técnica de interpolación. Además, los resultados sugieren también, en todos los casos, que se debe aumentar el número de sitios de muestreo, ya que una distancia de separación menor entre sitios define mejor

la tendencia de la variabilidad espacial de los valores de éstos (Flores, Reyes, & Moreno, 2004). También se recomienda que en futuros modelos se usen datos de OD obtenidos en otros trabajos realizados en el área de estudio. Sin embargo, no se encontraron trabajos que lleven a cabo una metodología similar a la propuesta en este estudio, por lo que este trabajo representa una primera aproximación a la estrategia descrita. De esta forma, en futuros trabajos se sugiere incorporar datos de otros años, así como integrar variables auxiliares, a fin de reforzar las estimaciones. Ese tipo de correlaciones espaciales son adecuadamente definidas a través de la técnica de coKriging, que tiene la ventaja de usar la covarianza de dos o más variables relacionadas.

Por otro lado, es importante mencionar que aun cuando fue posible modelar usando Kriging ordinario, existen factores ambientales y antrópicos que modifican de modo significativo la calidad del agua. Por ejemplo, los estacionales por el ingreso de agua durante la estación lluviosa, la existencia de un periodo de recuperación y las dinámicas temporales propias del ecosistema. Esta variación estacional ha sido explicada por diversos autores en diferentes ecosistemas. Así, Rubio, Contreras, Quintana, Saucedo y Pinales (2012) detectaron diferencias estacionales en la calidad del agua de la presa Luis L. León en el norte de México en nueve variables cuantificadas; mientras que Rabee, Bahha y Ahmed (2011) observaron estas variaciones en un estudio realizado en el río Tigris en Irak. Una vez que las lluvias terminan, la distribución espacial de la concentración de oxígeno es más bien heterogénea. Esta afirmación puede ser explicada porque la aportación de lluvia al lago no sólo es del principal afluente (río Lerma) sino de otros más. Por ejemplo, en octubre, la única fuente de aportación de agua al lago proviene del río Lerma, observándose incremento de la concentración de oxígeno en esa zona. Una posible explicación es que esto se presenta como consecuencia de un proceso de reaeración provocado por el movimiento del flujo de entrada de agua (De la Mora, 2001; Lind & Dávalos, 2001). Sin embargo, Simons (1984)

demonstró que otras variables tienen mayor influencia en la concentración de OD en el lago de Chapala, ya que después de aplicar un modelo hidrodinámico observó que es el viento, y no los flujos de entrada y salida el principal factor que determina los patrones de circulación del agua. En su modelo observó que con condiciones normales de viento de este a oeste a  $9 \text{ km h}^{-1}$ , el flujo del río Lerma se interna por la parte sur del lago hasta su parte media y retorna el flujo luego de esta zona. Cuando el viento predominante es de oeste a este, el flujo de agua del río Lerma discurre por la parte media del lago. Esta dinámica observada es un efectivo mecanismo de transporte de materiales suspendidos y oxígeno disuelto en el lago, lo cual provoca que la columna de agua esté en continuo movimiento, de ahí la poca variabilidad de sus parámetros fisicoquímicos a lo largo del año. Además, debido a la poca profundidad del lago y la mezcla del mismo, no existe estratificación estacional, pero como es el caso de otros lagos tropicales, sí existe una estratificación diaria cuando las condiciones climáticas lo propician (Lind & Dávalos, 2001). Normalmente las corrientes en el centro del lago son de un  $0.1 \text{ km día}^{-1}$  y en las zonas de las orillas es de  $0.5 \text{ km día}^{-1}$ . Por la orientación del lago (de este a oeste), el patrón de vientos ocasiona grandes olas y un cuerpo de agua completamente mezclado (Lind & Dávalos, 2001). Por otro lado, diversos estudios han demostrado que el lago de Chapala presenta problemas de eutrofización desde 1989, como resultado de la introducción de altas concentraciones de nutrientes (Fernex *et al.*, 2001; Waite, 1984). Desde 1983, el lago de Chapala muestra un incremento de la concentración de clorofila, lo cual le confiere características de mesotrófico superior a eutrófico (Limón & Lind, 1990; De Anda & Shear, 2001; Dávalos & Lind, 2001). En este sentido, se debe mencionar la importancia de la cinética de crecimiento de los diversos organismos por el uso del oxígeno presente en el agua para la respiración de las plantas acuáticas y el plancton (Thomann & Mueller, 1987). En los resultados encontrados en este trabajo no

se registraron condiciones de anoxia en el lago de Chapala, lo cual coincide con otros trabajos (Quiróz, Mora, Molina, & García, 2004; Lara, 2014).

## Conclusiones

Con este estudio fue posible modelar la variación espacial-temporal de las concentraciones de OD tanto a lo largo del lago de Chapala como en diferentes profundidades. En general, considerando al OD como uno de los principales indicadores de calidad del agua, se determinó que el agua de mejor calidad se concentró en febrero y diciembre, de acuerdo con el resultado espacial en la zona este del lago. Sin embargo, es importante remarcar que en el modelaje espacial se busca definir un modelo con el menor error de estimación, considerando las variables disponibles. Así, en futuros estudios se podrían probar otras estrategias de interpolación donde, entre otros aspectos, la estimación de la continuidad espacial podría ser mejorada si se considera una mayor intensidad de muestreo, en especial para los casos en los que los modelos no se ajusten bien a la distribución del variograma. Se concluye también que aunque la interpolación permitió definir la variación espacial del OD a lo largo del lago de Chapala, en la mayoría de los modelos el ajuste fue bajo. Es decir, los resultados de la validación presentaron una baja correlación entre los valores observados y los estimados, lo cual puede explicarse debido a que en algunos casos los variogramas presentaron una tendencia espacial a nivel global. Se remarca la importancia del análisis del variograma, previo a la realización de las estimaciones, donde se sugiere primero un análisis espacial más básico para evaluar la autocorrelación espacial de un parámetro dado, como el índice de Moran (Reich & Geils, 1992). No obstante, los resultados presentan información importante para que, en posteriores estudios, se pueda definir apropiadamente la forma de incluir otros elementos para la modelación espacial, como son, por ejemplo, factores ambientales y antrópicos.

## Referencias

- Armstrong, M. (1998). *Basic linear geostatistics*. New York: Springer.
- Bai, Q., Runling, L., Li, Z., Lepparanta, M., Arvola, L., & Li, M. (2016). Time-series analyses of water temperature and dissolved oxygen concentration in Lake Valkea-Kotinen (Finland) during ice season. *Ecological Informatics*, 36, 181-189.
- Beltrán, R., Ramírez, J. P., & Sánchez, J. (2012). Comportamiento de la temperatura y el oxígeno disuelto en la Presa Picachos, Sinaloa, México. *Revista Mexicana de Hidrobiología*, 22, 94-98.
- Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of geographical information systems*. Oxford, United Kingdom: Oxford University Press.
- Czaplewski, R. L., Reich, R. M., & Bechtold, W. A. (1994). Spatial autocorrelation in growth of undisturbed natural pine stand across Georgia. *Forest Science*, 40, 314-328.
- Dávalos, L., & Lind, O.T. (2001). Phytoplankton and bacterioplankton production and trophic relation in Lake Chapala (pp. 31-57). In: *The Lerma Chapala watershed, evaluation and management*. Hansen, A. M., & Van Afferden, M. (eds.). New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- De Anda, J., & Shear, H. (2001). Nutrients and eutrophication in Lake Chapala (pp. 183-198). In: *The Lerma-Chapala watershed, evaluation and management*. Hansen, A. M., & Van Afferden, M. (eds.). New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- De Jonge, V. N., Elliott, M., & Orive, E. (2002). Causes, historical development, effects and future challenges of a common environmental problem: eutrophication. *Hydrobiologia*, 1, 1-19.
- De la Mora, C., Flores, J. G., Ruíz, J. A., & García, J. (2004). Modelaje estocástico de la variabilidad espacial de la calidad agua en un ecosistema lacustre. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 20(3), 99-108.
- De la Mora, O. C. (2001). *Evaluación de la calidad del agua del lago de Chapala durante 1996-1997*. Tesis de maestría. Zapopan, México: Universidad de Guadalajara.
- Dodd, E. A., Mechant, Ch., Rayner, N., & Morice, C. (2015). An investigation into the impact of using various techniques to estimate arctic surface air temperature anomalies. *Journal of Climate, American Meteorological Society*, 2015, 1743-1763, DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00250.1>.
- Fernex, F., Zárate del V., P., Ramírez, H., Michaud, F., Parron, C., Dalmasso, J., Barci F., G., & Guzmán, M. (2001). Sedimentation rates in Lake Chapala (western Mexico): Possible active tectonic control: *Chemical Geology*, 177, 213-228. DOI: 10.1016/S0009-2541(00)00346-6.
- Flores, J. G., & Moreno, D. A. (2005). Modelaje espacial de la influencia de combustibles forestales sobre la regeneración natural de un bosque perturbado. *Agrociencia*, 39(3), 339-349.
- Flores, J. G., Reyes, O., & Moreno, D. A. (2004). Variación espacial del diámetro como respuesta a diferentes intensidades de muestreo en una cuenca forestal. *Rev. Ciencia Forestal en México*, 29(96), 47-66.
- Gallardo, A. (2006). Geostatística. *Ecosistemas*, 15(3), 48-58.
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation. Applied geostatistics series*. New York: Oxford University Press.
- Hansen, A. M., & Van Afferden, M. (2004a). Modeling cadmium concentration in water of Lake Chapala, Mexico. *Aquatic Sciences*, 66, 266-273.
- Hansen, A. M., & Van Afferden, M. (2004b). El agua de México visto desde la Academia. Jiménez, B., & Martín, L. (eds.). México, DF: Academia Mexicana de Ciencias.
- Heddum, S. (2014). Modeling hourly dissolved oxygen concentration (DO) using two different adaptive neuro-fuzzy inference systems (ANFIS): A comparative study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186, 597-619.
- Iriondo, A., & Mota, J. (2004). *Desarrollo de una red neuronal para estimar el oxígeno disuelto en el agua a partir de instrumentación de EDAR*. XXV Jornadas de Automática, Universidad de Castilla la Mancha, Ciudad Real, España, 8-10 de septiembre.
- Isaaks, E. H., & Srivastava, R. M. (1989). *An introduction to applied geostatistics*. New York: Oxford University Press.
- Lai, D. Y. F., & Lam, K. C. (2008). Phosphorus retention and release by sediments in the eutrophic Mai Po Marshes, Hong Kong. *Marine Pollution Bulletin*, 57, 349-356.
- Lara, O. M. A. (2014). *Aspectos ecológicos, cultivo, contenido de lípidos totales y proteínas del fitoplancton nativo de un lago polimíctico tropical (lago de Chapala)*. Tesis de maestría en Ciencias en Biosistemática y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas. Zapopan, México: Universidad de Guadalajara.
- Limón, J. G., & Lind, O. T. (1990). The management of Lake Chapala, México. *Lake Reservoir Management*, 6, 61-70.
- Lind, O. T., & Dávalos, L. (2001). An introduction to the limnology of Lake Chapala, Jalisco, Mexico (pp. 139-149). In: *The Lerma-Chapala Watershed*. Boston: Springer.
- Mestre, R. J. E. (2011). *La cuenca Lerma-Chapala, México. Estudio de caso VIII*. Recuperado de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacd/scan/033446/033446-18.pdf>.
- Nakova, E., Linnebank, F. E., Bredeweg, B., Salles, P., & Uzunov, Y. (2009). The river MESTA case study: A qualitative model of dissolved oxygen in aquatic ecosystems. *Ecological Informatics*, 4, 339-357.
- Null, S. E., Mouzon, N. R., & Elmore, L. R. (2017). Dissolved oxygen, stream temperature, and fish habitat response to environmental water purchases. *Journal of Environmental Management*, 197, 559-570.
- Olea, R. A. (1991). *Geostatistical glossary and multilingual dictionary*. New York: Oxford University Press.

- Paéz, A., Alfaro, R., Cortés, R., & Segovia, N. (2013). Arsenic content and physicochemical parameters of water from wells and thermal springs at Cuitzeo Lake Basin, Mexico. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2, 12.
- Paré, L. (1989). *Los pescadores de Chapala y la defensa de su lago* (144 pp.). Guadalajara, México: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente.
- Quiróz, C. H., Mora, Z. L. M., Molina, A. I., & García, R. J. (2004). Variación de los organismos fitoplanctónicos y la calidad del agua en el lago de Chapala, Jalisco, México. *Acta Universitaria*, 14(1), 47-58.
- Rabee, A. M., Bahha, A. K., & Ahmed, A. (2011). Seasonal variations of some ecological parameters in Tigris River water at Baghdad region Iraq. *J. Water Resources Protection*, 3, 262-267.
- Reich, R. M., & Geils, B. W. (1992). Review of spatial analysis techniques. Spatial analysis and forest pest management. USDA, FS. *General Technical Report*, 75, 142-149.
- Rizo, L. D., & Andreo, B. (2016). Water quality assessment of the Santiago River and attenuation capacity of pollutants downstream Guadalajara City, Mexico. *River Research and Application*, 32, 1505-1516.
- Rosales, L., Carranza, A., & López, M. (2000). Heavy metals in sediments of a large, turbid tropical lake affected by anthropogenic discharges. *Environmental Geology*, 39, 378-383.
- Rubio, H., Contreras, M., Quintana, R. M., Saucedo, R., & Pinales, A. (2012). An overall water quality index (WQI) for a man-made aquatic reservoir in Mexico. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 9, 1687-1698.
- Samra, J. S., Gill, H. S., & Bhatia, V. K. (1989). Spatial stochastic modeling of growth and forest resource evaluation. *Forest Science*, 35, 663-676.
- Sedeño, J. E., & López, E. (2007). Water quality in the Río Lerma, Mexico: an overview of the last quarter of the twentieth century. *Water Resources Management*, 21, 1797-1812.
- Simons, T. J. (1984) *Effect of outflow diversion on circulation and water quality of Lake Chapala*. Project MEX-CWS-010. Guadalajara, México: Centro de Estudios Limnológicos, Secretaría de Recursos Hidráulicos, Pan American Health Organization.
- Singaraja, C., Chidambaram, S., Prasanna, M. V., Paramaguru, P., Johnsonbabu, G., & Thivya, C. (2011). A study on the behavior of the dissolved oxygen in the shallow coastal wells of Cuddalore District, Tamilnadu, India. *Water Quality Exposure Health*, 4(1), 1-16.
- Thomann, R., & Mueller, J. (1987). *Principles of surface water quality modeling and control*. New York: Harper and Row, Publishers, Inc.
- Trujillo, J. L., Saucedo, N. P., Zárate del V., P. F., Ríos, N., Mendizábal, E., & Gómez, S. (2010). Speciation and sources of toxic metals in sediments of Lake Chapala, Mexico. *J. Mex. Che. Soc.*, 54, 79-87.
- USGS (2013). *National field manual for the collection of quality-water data*. Reston, USA: United States Department of the Interior, United States Geological Survey.
- Waite, T. D. (1984). *Principles of water quality* (289 pp.). Orlando: Academic Press, Inc.
- Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and river ecosystems*. San Diego: Academic Press.
- Wu, Y., Wen, Y., Zhou, J., & Wu, Y. (2014). Phosphorus release from lake sediments: Effects of pH, temperature and dissolved oxygen. *Journal of Civil Engineering*, 18, 323-329.
- Yuan, L. L., & Pollard, A. I. (2015). Classifying lakes to quantify relationships between epilimnetic chlorophyll a and hypoxia. *Environmental Management*, 55, 578-587.
- Zhai, S., Yang, L., & Hu, W. (2009). Observations of atmospheric nitrogen and phosphorus deposition during the period of algal bloom formation in northern lake Taihu, China. *Environmental Management*, 44, 542-551.
- Zhang, Y., Wu, Z., Liu, M., He, J., Shi, K., Zhou, Y., Wang, M., & Liu, X. (2015). Dissolved oxygen stratification and response to thermal structure and long-term climate change in a large and deep subtropical reservoir (Lake Qiandaohu, China). *Water Research*, 75, 249-258.

## Dirección institucional de los autores

Dra. Celia de la Mora Orozco  
 Dr. José Germán Flores Garnica  
 Dr. Hugo Ernesto Flores López  
 M.C. Álvaro Agustín Chávez Durán  
 M.C. Jesús Manuel Ochoa Rivero

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)  
 Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco  
 Carretera Tepatitlán-Lagos de Moreno, km 8. Col. Rancho Las Cruces  
 47600 Tepatitlán de Morelos, Jalisco, MÉXICO  
 delamora.celia@inifap.gob.mx  
 flores.german@inifap.gob.mx  
 flores.hugo@inifap.gob.mx  
 chavez.alvaro@inifap.gob.mx  
 ochoa.jesus@inifap.gob.mx

Dr. Héctor Osbaldo Rubio Arias

Universidad Autónoma de Chihuahua  
 Facultad de Zootecnia y Ecología  
 Periférico Francisco R. Almada, km 1  
 31000 Chihuahua, Chihuahua, MÉXICO  
 rubioa1105@hotmail.com

*Dr. Javier García Velasco*

Universidad de Guadalajara  
Centro Universitario de Ciencias Biológicas y  
Agropecuarias  
Camino Ramón Padilla Sánchez 2100  
45220 Nextipac, Zapopan, Jalisco, MÉXICO  
jagarcia@cucba.udg.mx

# Estudio de la calidad bacteriológica y parámetros fisicoquímicos del agua del Distrito de Riego 023

• Nami Morales-Durán • Anaí de la Torre-González •  
• Víctor García-Sánchez • Carlos Chávez\* •  
*Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México*

\*Autor para correspondencia

DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-04

## Resumen

Morales-Durán, N., De la Torre-González, A., García-Sánchez, V., & Chávez, C. (enero-febrero, 2018). Estudio de la calidad bacteriológica y parámetros fisicoquímicos del agua del Distrito de Riego 023. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(1), 53-67, DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-04.

San Juan del Río, Querétaro (México), es una de las regiones industriales más importantes del estado, lo que ha llevado a un gran desarrollo demográfico y el incremento en la demanda de recursos para satisfacer las necesidades de la población creciente, sobre todo en los recursos hídricos, como es el caso del Distrito de Riego 023 (DR 023), en el cual, 11 048 ha son destinadas a la producción de cultivos de importancia agrícola. Sin embargo, el problema que se presenta es que con el crecimiento demográfico de los últimos años, las áreas urbanas se han desarrollado cerca de la red de canales, lo que lleva consigo a la descarga de aguas negras a la red de distribución. En este trabajo se examinaron las concentraciones de bacterias coliformes fecales en el agua de 53 puntos del DR 023 en abril de 2015, así como las condiciones fisicoquímicas. Además, se compararon los niveles de coliformes fecales obtenidos con los permitidos por la Ley Federal de Derechos y Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2015 y la NOM-001-Semarnat-1996. Se encontró que la mayoría de los puntos en los que se obtuvo muestra presentaron niveles altos de coliformes fecales y condiciones fisicoquímicas no ideales para su uso en el riego de cultivos. Estos resultados denotan la necesidad de un monitoreo constante de los cuerpos de agua destinados a la agricultura en la región, ya que los microorganismos indicadores fecales indican la potencial presencia de patógenos en el agua.

**Palabras clave:** contaminación del agua, coliformes fecales, calidad bacteriológica.

## Abstract

Morales-Durán, N., De la Torre-González, A., García-Sánchez, V., & Chávez, C. (January-February, 2018). Study of the bacteriological quality and physicochemical parameters of water from the Irrigation District 023. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 9(1), 53-67, DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-04.

San Juan del Río, Querétaro (Mexico), is one of the most important industrial regions of the state, which has led to a great demographic development and the increase in the demand of resources to meet the needs of the growing population, especially in water resources, such as the Irrigation District 023 (DR 023), in which 11 048 ha are destined to the production of crops of agricultural importance. However, with population growth of recent years, urban areas have developed near the canal network, which carries the wastewater discharge to the distribution network. In this work the concentrations of fecal coliform bacteria in the water of 53 points of the DR 023 in April 2015, and the physicochemical conditions were examined. In addition, fecal coliform obtained levels were compared with those permitted by the Federal Law of Rights and Applicable Disposition on Matters of National Waters 2015 and NOM-001-Semarnat-1996. We found that most of the points on which sample was obtained, showed high levels of fecal coliform and physicochemical conditions not appropriate for use in irrigation. These results indicate the need for constant monitoring of water bodies for agriculture in the region, as fecal indicator organisms indicate the potential presence of pathogens in the water.

**Keywords:** Water contamination, fecal coliform, bacteriological quality.

---

Recibido: 22/07/2016  
Aceptado: 01/08/2017

---

## Introducción

Debido al incremento de la población mundial, la demanda de agua ha aumentado por la necesidad de producir más alimentos (Mazari-Hiriart *et al.*, 2008). En México, gran parte del agua es empleada en el sector agrícola (Conagua, 2014a), sin embargo, la demanda de agua dulce es superior a su disponibilidad para la agricultura; por ello se recurre al uso de aguas residuales tratadas y no tratadas (Huibers & Van Lier, 2005; Mazari-Hiriart *et al.*, 2008).

Como se menciona en el estudio de Mazari-Hiriart *et al.* (2008), México es uno de los principales países que emplea aguas residuales tratadas para el riego, pero la mayoría de las veces no se tiene un control de la calidad del agua. Dado el origen de este tipo de agua, existen normas que establecen indicadores físicos, químicos y biológicos, como coliformes fecales, huevos de helminto, demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO5), demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (SST), pH y temperatura (Conagua, 2014a y 2014b; NOM-001-Semarnat-1996), que establecen su respectivo límite máximo permitido para mantener la calidad requerida, según sea su uso y destino (Conagua, 2013). Se han realizado estudios sobre la calidad del agua en diferentes distritos de riego de la república mexicana. Por ejemplo, Ahumada y colaboradores reportaron en una sección de 3.6 km del canal La Michoacana en Navolato, Sinaloa, un gran número de bacterias coliformes fecales del género *Enterobacter*, *Escherichia* y *Kluyvera*. Esto fue atribuido a que el canal recibe escurrimientos de riego, descargas de drenajes domésticos, aguas residuales y desechos sólidos (Ahumada-Santos *et al.*, 2014).

Estudios similares en el DR 035, La Antigua Veracruz, el DR 009 Valle de Juárez, Chihuahua y el DR 049, Río Verde, San Luis Potosí, reportan que las cantidades de coliformes fecales están por encima de lo que indica la NOM-001-Semarnat-1996 (Megchún-García *et al.*, 2015;

Olivas-Enriquez *et al.*, 2011; Sarabia-Meléndez, Cisneros-Almazán, Aceves-de-Alba, Durán-García, & Castro-Larragoitia, 2011) e incluso, en un estudio realizado en el Valle del Mezquital dentro del DR 003 y DR 100, se reportó la presencia de parásitos de importancia clínica, como *Ascaris lumbricoides*, *Giardia lamblia* y *Entamoeba histolytica* (Cifuentes, Blumenthal, Ruíz-Palacios, Bennett, & Peasey, 1994; Hernández-Acosta, Quiñones-Aguilar, Cristóbal-Acevedo, & Rubiños-Panta, 2014).

Respecto a las variables fisicoquímicas en el DR 030, se examinaron los niveles de pH, temperatura, sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica y salinidad, entre otras, y se determinó que el agua de ese sitio no es recomendable para uso agrícola (Bonilla, Ayala-Osorio, González-Contreras, Santamaría-Juárez, & Silva-Gómez, 2016).

En un estudio realizado por Saldaña-Fabela, Díaz-Pardo y Gutiérrez-Hernández (2011), se analizó la calidad fisicoquímica del agua en tres puntos del DR 023, San Juan del Río. En dicho estudio se concluyó que el agua de esta región no es apta para ser utilizada en el riego agrícola ni en la conservación de la biota y la piscicultura; se consideró al sistema como eutrófico.

La información fisicoquímica y bacteriológica del agua en el DR 023 es escasa; sin embargo, la región está catalogada en riesgo ambiental, ya que presenta un alto grado de contaminación (Saldaña-Fabela, Díaz-Pardo, & Gutiérrez-Hernández, 2011; Vázquez-Sánchez & Pineda-López, 2010), por lo que requiere de una actualización. El objetivo de este trabajo fue presentar un análisis de la calidad del agua en el DR 023 en el mes de abril de 2015, a fin de conocer el estado actual de los recursos hídricos de la región, así como alertar de un posible riesgo de contaminación en los cuerpos de agua. Se espera que el agua del DR 023 esté contaminada principalmente por las diferentes descargas de las aguas residuales que recibe debido a la falta de monitoreo para regular estas fuentes de contaminación.

## Materiales y métodos

### Descripción del área de estudio

El Distrito de Riego 023 se encuentra ubicado entre los municipios de San Juan del Río y Pedro Escobedo en el estado de Querétaro, México, y posee una superficie de 11 048 ha. El agua para el riego se obtiene de las presas San Ildefonso, Constitución de 1917 y La Llave, así como del bordo La Venta, y de 54 pozos profundos (Cisneros-Estrada & Castanedo-Guerra, 2014). Se realizó un muestreo aleatorio en 44 puntos, una muestra por punto, en la red de abastecimiento de agua de riego en el DR 023: cinco presas, cuatro represas, tres canales principales, 17 canales laterales, dos canales sublaterales, dos en diferentes puntos del río San Juan, tres obras

de toma, dos fuentes de abastecimiento y seis descargas de aguas tratadas, y nueve puntos en los drenes con ubicación cercana a algunos puntos del muestreo (cuadro 2). Los resultados que se muestran en el cuadro 2 se explican con detenimiento en la sección de resultados.

### Toma de muestra

De acuerdo con la disponibilidad de agua, durante abril de 2015 se tomaron muestras de 53 puntos en el Distrito de Riego 023, San Juan del Río (figura 1). Las muestras de agua fueron colectadas en frascos de plástico de 100 ml, previamente rotulados. Se cubrieron con papel aluminio y fueron depositados en hieleras para su posterior análisis en el laboratorio. Se obtuvieron valores fisicoquímicos de pH,

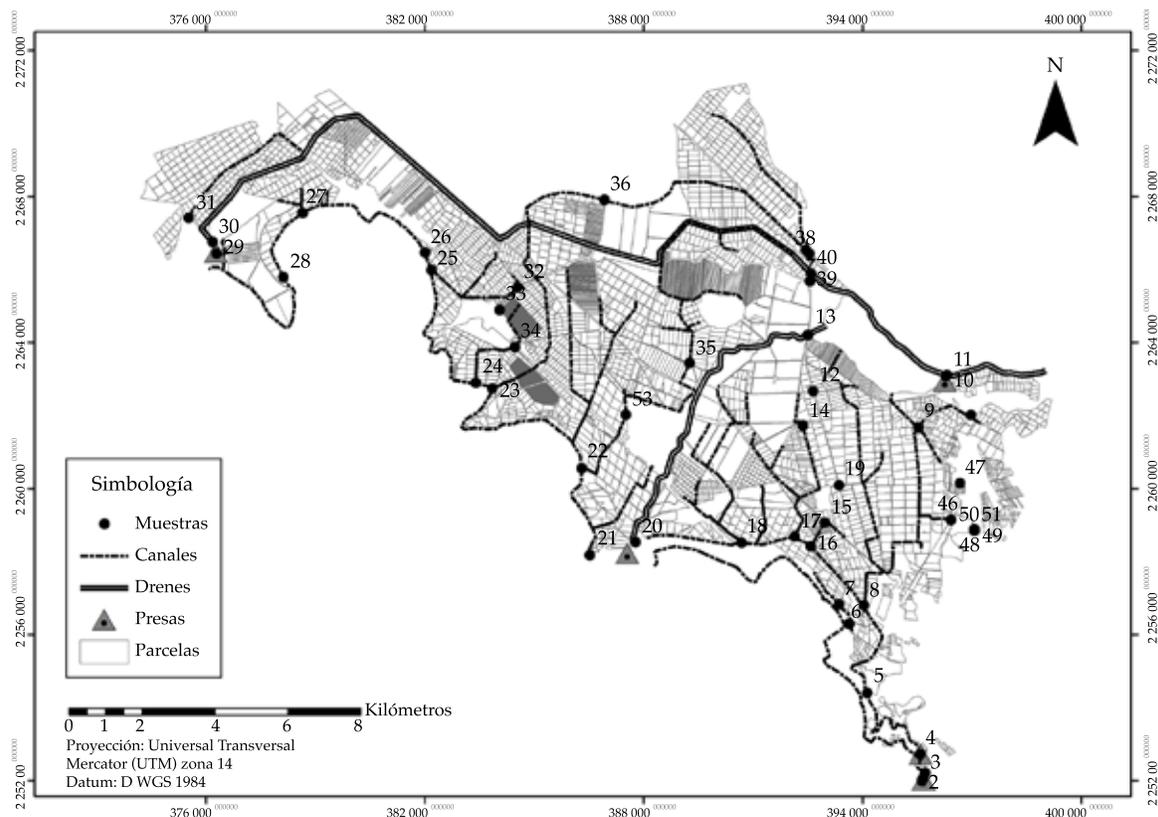


Figura 1. Mapa de localización de los puntos de muestreo en el Distrito de Riego 023 San Juan del Río, Querétaro. Los puntos 41-45 no aparecen en el mapa por cuestiones de escala; sin embargo, los puntos 44 y 45 son las fuentes de alimentación de la presa de San Ildefonso (punto 43).

conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (SDT) y temperatura (T), con el medidor multiparamétrico portátil HI9813-5 en la misma zona en el que se tomaron las muestras de agua (cuadro 2).

#### Aislamiento de coliformes y enterobacterias

En condiciones de esterilidad en el laboratorio, las muestras fueron homogenizadas y de acuerdo con el grado de turbidez, se realizaron diluciones con agua destilada estéril. De la dilución obtenida se tomó un mililitro y por triplicado se inoculó en placas 3M™ Petrifilm™ para coliformes y enterobacterias, siguiendo las instrucciones del fabricante. Sin embargo, este método no cuenta con la sensibilidad necesaria para poder identificar a nivel de género (p. ej., *Escherichia*, *Klebsiella*) sino que permite distinguir entre grupos de bacterias que pueden fermentar lactosa y están asociados con patógenos. Las placas fueron incubadas a 37 °C por 24 horas. El conteo de coliformes se llevó a cabo por el método aprobado por la Asociación Francesa de Normalización (3M Microbiology, 2003), el cual consiste en contar todas las colonias rojas con o sin producción de gas. En algunos casos, donde el crecimiento de colonias fue abundante (mayor a 150 UFC), se realizó el conteo mediante cuadrantes, en el cual se cuentan las colonias de varios cuadrantes representativos, se obtiene el promedio y se multiplica por 20 (ya que el área de crecimiento

de la placa es de 20 cm<sup>2</sup>). Para el análisis de calidad de agua se compararon con los límites máximos permitidos de coliformes fecales de la norma NOM-001-Semarnat-1996 debido a que esta norma regula los niveles de contaminantes en las descargas de aguas residuales que se vierten en aguas y bienes nacionales. Sin embargo, en la actualidad no existe una norma que regule la calidad del agua que sea específica para los bienes nacionales o el agua de riego, por ello se tomó como referencia la Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2015 (cuadro 1), para comparar las muestras que pertenecen a toda la red de distribución, con excepción de los puntos correspondientes a drenes.

#### Pruebas estadísticas

Los datos de las muestras se clasificaron en grupos según la muestra de procedencia: laterales, sublaterales, fuentes de abastecimiento, canales principales, descargas, presas, represas, obras de toma y drenes. Al no cumplir con los supuestos de normalidad, se realizó una prueba unilateral no paramétrica (Kruskal-Wallis) para ver las diferencias entre la medias de los grupos; posteriormente se realizó la prueba de Dunn, que es una prueba de comparación múltiple y se aplica cuando se da el rechazo de la prueba de Kruskal-Wallis, y determina diferencias o similitudes dentro de los grupos de los que se obtuvieron muestras.

Cuadro 1. Normas empleadas como referencia para establecer los límites máximos permitidos.

Norma	Parámetro	Límite máximo	Tipo de agua
NOM-001-Semarnat-1996	Coliformes fecales	1000 - 2000 NMP por cada 100 ml	Descargas de aguas residuales
	pH	5-10	
	Temperatura	40 °C	
Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2015	Coliformes fecales	1 000 NMP por cada 100 ml	Aguas nacionales: mares, lagunas, esteros, lagos, agua de corrientes constantes e intermitentes, ríos y afluentes directos e indirectos, manantiales, cauces, vasos, riberas y agua de subsuelo
	pH	6.0 - 9.0	
	Sólidos disueltos	500 mg/l	

## Resultados

### a) Resumen de datos fisicoquímicos y tipo de agua de acuerdo con la carga de coliformes totales y fecales

Las condiciones fisicoquímicas, como pH, T, SDT y CE de las diferentes zonas se muestran en el cuadro 2. Estos resultados se compararon cuando resultaba pertinente con los valores máximos permisibles que establece la Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2014 y la NOM-001-Semarnat-1996.

De manera general, la temperatura del agua se encontró dentro el rango de 15 a 30 °C. El punto de la Obra de Toma San Ildefonso (punto 1) y Obra de Toma San Ildefonso (punto 2) fueron los sitios que presentaron las temperaturas más bajas (15 y 15.2 °C, respectivamente), mientras que la descarga de la empresa Kimberly fue el punto con la temperatura más alta (30 °C). La temperatura de las descargas se comparó con los valores indicados por la NOM-001-Semarnat-1996; ninguna de las descargas sobrepasó el límite de 40 °C (cuadro 2).

Respecto a la CE, el valor mínimo fue 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y el valor máximo resultante fue de 7 580  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , el cual correspondió a la descarga municipal llamada San Pedro 1. Los valores de CE no se encuentran regulados por ninguna legislación o norma mexicana, por lo que no se compararon con valores estándar (cuadro 2), sin embargo se discutirá más adelante el efecto de este parámetro sobre la calidad del agua.

En el caso de sólidos disueltos, se tomó como base la Ley de Federal de Derechos y Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2015, la cual indica un valor máximo de 500 mg/l. En el DR 023 se observó que los puntos brazo izquierdo río San Juan, aguas abajo descarga municipal San Pedro 1, aguas arriba de las descargas y el río San Juan fueron los sitios con el mayor valor de sólidos disueltos, con un valor de 10 000 ppm; mientras que el valor mínimo obtenido fue de 10 ppm, correspondiente al lateral 13+103. Los valores más altos que se obtuvieron inclusive sobrepasan los límites

máximos para agua potable establecido por la NOM-127-SSA1-1994, que determina como valor máximo 1 000 ppm.

Los valores de pH se encontraron en el intervalo de 6.6 y 9.5. Respecto al agua de las descargas, ningún punto superó el límite de pH indicado por la NOM-001-Semarnat-1996 (pH 10). Sin embargo, al comparar los valores obtenidos con la Ley Federal de Derechos y Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2015, los puntos que superaron el límite máximo de pH fueron la presa La Venta y el sublateral 2+407, que se localiza en el camino a Chintepec, con un pH de 9.3 y 9.5, respectivamente.

Para verificar la validez del uso del agua en el riego de hortalizas y conocer las condiciones bacteriológicas del agua del DR 023, se clasificaron los puntos de muestreo como indica la NOM-CCA-033-ECOL/1993 con respecto a los coliformes totales y los coliformes fecales en 100 ml de agua. Quince puntos se clasificaron como agua tipo IV, que es el agua que contiene más de 100 000 coliformes fecales; 26 puntos están en la categoría tipo III, aquella que contiene de 1 001 a 100 000 coliformes fecales; dos puntos como agua tipo II, que contiene de 1 a 1 000 coliformes fecales, y por último se encontraron tres puntos como agua tipo I, que contiene menos de 1 000 coliformes totales. Siete puntos no se pudieron clasificar de acuerdo con la NOM-CCA-033-ECOL/1993 debido a que el crecimiento de coliformes fecales fue menor a 1 000 (cuadro 2).

### b) Conteo de coliformes fecales en los puntos de muestreo

De los 53 puntos analizados del DR 023 se obtuvieron muestras de seis descargas de aguas (figura 2), de las cuales, al realizar el conteo de las UFC de coliformes fecales, se observó que todas las muestras, excepto la descarga de Kimberly, sobrepasaron el límite máximo indicado por la NOM-001-Semarnat-1996 (figura 2). Los puntos con la mayor cantidad de coliformes fecales en las descargas fueron la descarga municipal San Pedro 1 con  $41 \times 10^6$  UFC en 100 ml de agua. La descarga Ponderosa fue la que presentó menor

Cuadro 2. Descripción de las condiciones de temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos, potencial de hidrógeno (pH) y promedio de UFC para coliformes totales, fecales y enterobacterias de los puntos de toma de muestra del Distrito de Riego 023, así como la clasificación de los tipos de agua de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOMCCA-033-ECOL/1993. El guión “-” se empleó para datos que no entran en la clasificación con base en la norma. El signo “x” se empleó para muestras que no presentaron coliformes totales y que no entran dentro de la clasificación de la norma.

Promedio de UFC/100 ml										
Punto	Nombre	Temperatura (°C)	Conductividad eléctrica (mS/cm)	Sólidos disueltos (ppm)	pH	Coliformes totales	Coliformes fecales	Enterobacterias	Tipo de agua según la carga de coliformes fecales (NOMCCA-033-ECOL/1993)	Tipo de agua según la carga de coliformes totales (NOMCCA-033-ECOL/1993)
1	Descarga Kimberly	30	0.37	200	7.6	3.7x10 <sup>7</sup>	0	8.5 x10 <sup>3</sup>	-	-
2	Presa Constitución 1857	18	0.09	78	8.2	5.1 x10 <sup>4</sup>	5.3 x10 <sup>3</sup>	6.7 x10 <sup>3</sup>	Tipo 3	-
3	Desarenador Constitución 1857	17	0.1	82	7.5	1 x10 <sup>5</sup>	0	2.3 x10 <sup>4</sup>	-	-
4	Presa derivadora Lomo de Toro	19.6	0.05	97	7	3.8 x10 <sup>4</sup>	3 x10 <sup>3</sup>	1.4 x10 <sup>4</sup>	Tipo 3	-
5	Estación de aforo Lomo de Toro	20.2	0.1	80	6.9	0	0	0	-	x
6	Canal lateral Kimberly	21.6	1.29	950	7.6	8.9 x10 <sup>4</sup>	1 x10 <sup>3</sup>	9.3 x10 <sup>3</sup>	Tipo 2	-
7	Regadera Kimberly	21.6	1.1	96.9	8	3.5 x10 <sup>5</sup>	4 x10 <sup>3</sup>	3.7 x10 <sup>4</sup>	Tipo 3	-
8	Lateral 6+640	20.2	0.1	80	7.3	9.4 x10 <sup>4</sup>	2 x10 <sup>3</sup>	5.3 x10 <sup>3</sup>	Tipo 3	-
9	Represa Pozo 7	20.7	0.1	82	7.2	4.9 x10 <sup>4</sup>	2 x10 <sup>3</sup>	5 x10 <sup>3</sup>	Tipo 3	-
10	Presa La Llave	18.4	1.52	388	6.6	2.9 x10 <sup>6</sup>	1.7 x10 <sup>6</sup>	3 x10 <sup>3</sup>	Tipo 4	-
11	Dren Culebra	19.8	0.77	580	7.1	1.6 x10 <sup>8</sup>	2.2 x10 <sup>7</sup>	1.7 x10 <sup>4</sup>	Tipo 4	-
12	Dren Santa Matilde (punto medio)	21.1	0.44	305	6.8	1.1 x10 <sup>6</sup>	5.6 x10 <sup>5</sup>	1.7 x10 <sup>3</sup>	Tipo 4	-
13	Dren Caracol Organal	20.3	0.34	200.49	6.9	3.1 x10 <sup>4</sup>	1.6 x10 <sup>3</sup>	2.8 x10 <sup>3</sup>	Tipo 3	-
14	Sublateral 9+345	21.8	0.16	124	7.3	7.8 x10 <sup>4</sup>	3 x10 <sup>4</sup>	8.5 x10 <sup>3</sup>	Tipo 3	-
15	Lateral 8+705 puente	22.2	0.19	146	8.9	1.2 x10 <sup>8</sup>	2.1 x10 <sup>7</sup>	3.4 x10 <sup>4</sup>	Tipo 4	-
16	Lateral 9+345 después de pozo 17	24.3	0.13	98	7.4	3.3 x10 <sup>4</sup>	1.1 x10 <sup>4</sup>	5.5 x10 <sup>4</sup>	Tipo 3	-
17	Lateral 8+705 junto al pozo 15	21	0.08	70	7.6	2.0 x10 <sup>4</sup>	1.3 x10 <sup>3</sup>	9.9 x10 <sup>3</sup>	Tipo 3	-
18	Lateral 10+795 junto al pozo 23	21.6	0.08	62	7.4	2.5 x10 <sup>4</sup>	5.3 x10 <sup>3</sup>	5.1 x10 <sup>4</sup>	Tipo 3	-

Cuadro 2 (continuación). Descripción de las condiciones de temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos, potencial de hidrógeno (pH) y promedio de UFC para coliformes totales, fecales y enterobacterias de los puntos de toma de muestra del Distrito de Riego 023, así como la clasificación de los tipos de agua de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOMCCA-033-ECOL/1993. El guión “-” se empleó para datos que no entran en la clasificación con base en la norma. El signo “x” se empleó para muestras que no presentaron coliformes totales y que no entran dentro de la clasificación de la norma.

Punto	Nombre	Temperatura (°C)	Promedio de UFC/100 ml										
			Conductividad eléctrica (mS/cm)	Sólidos disueltos (ppm)	pH	Coliformes totales	Coliformes fecales	Enterobacterias	Tipo de agua según la carga de coliformes fecales (NOMCCA-033-ECOL/1993)	Tipo de agua según la carga de coliformes totales (NOMCCA-033-ECOL/1993)			
19	Dren Santa Matilde (inicio)	21.7	0.32	240	7.2	4.2 x10 <sup>4</sup>	2.6 x10 <sup>3</sup>	1.4 x10 <sup>4</sup>	Tipo 3	-			
20	Tanque amortiguador dren Caracol	22	0.2	223	6.7	2.3 x10 <sup>3</sup>	0	3 x10 <sup>2</sup>	-	-			
21	Obra de toma de la presa Constitución 1917	26.4	0.12	51	8.3	2.6 x10 <sup>4</sup>	1 x10 <sup>3</sup>	8.9 x10 <sup>3</sup>	Tipo 2	-			
22	Lateral 2+607	23.7	0.12	92	6.7	7.2 x10 <sup>4</sup>	4.3 x10 <sup>4</sup>	6.4 x10 <sup>3</sup>	Tipo 3	-			
23	Lateral 8+100	24.6	0.12	99	7.3	4 x10 <sup>4</sup>	2 x10 <sup>4</sup>	4.3 x10 <sup>3</sup>	Tipo 3	-			
24	Lateral 8+590 punto inicial	23.6	0.1	87	7.3	8.3 x10 <sup>4</sup>	5 x10 <sup>4</sup>	4.5 x10 <sup>3</sup>	Tipo 3	-			
25	Lateral 13+103	23.2	0.14	10	7.1	6.2 x10 <sup>4</sup>	3.6 x10 <sup>4</sup>	6.7 x10 <sup>3</sup>	Tipo 3	-			
26	Lateral 13+163 (inicio) cerca del pozo 41	24.1	0.15	117	7.1	1 x10 <sup>5</sup>	6.6 x10 <sup>4</sup>	1.6 x10 <sup>4</sup>	Tipo 3	-			
27	Lateral 17+810 del pozo 44	25.7	0.15	114	6.8	4.9 x10 <sup>4</sup>	1.6 x10 <sup>4</sup>	6.2 x10 <sup>3</sup>	Tipo 3	-			
28	Represa radial 9	27.5	0.27	199	6.7	0	0	1 x10 <sup>3</sup>	-	x			
29	Presa La Venta	27.3	0.35	250	9.3	7.8 x10 <sup>4</sup>	1.3 x10 <sup>4</sup>	1.4 x10 <sup>4</sup>	Tipo 3	-			
30	Dren Culebra (inicio)	22.8	0.59	429	7.3	1.4 x10 <sup>7</sup>	1.9 x10 <sup>6</sup>	2 x10 <sup>4</sup>	Tipo 4	-			
31	Obra de toma de la presa La Venta	27.8	0.23	167	8.2	7.3 x10 <sup>4</sup>	3.3 x10 <sup>3</sup>	3.4 x10 <sup>4</sup>	Tipo 3	-			
32	Canal lateral 13+103 (final) pozo 38	24.8	0.34	245	8.8	9.6 x10 <sup>3</sup>	3.6 x10 <sup>4</sup>	2.8 x10 <sup>4</sup>	Tipo 3	-			
33	Dren La D	24.9	0.62	448	7.5	2.8 x10 <sup>6</sup>	1.4 x10 <sup>6</sup>	3.9 x10 <sup>3</sup>	Tipo 4	-			
34	Lateral 8+590 antes de Panamericana	22.4	0.12	98	7.8	7.3 x10 <sup>4</sup>	4.3 x10 <sup>4</sup>	4.8 x10 <sup>3</sup>	Tipo 3	-			
35	Sublateral 2+407 camino a Chintepec	23.8	0.12	92	9.5	1 x10 <sup>5</sup>	3 x10 <sup>3</sup>	6.3 x10 <sup>4</sup>	Tipo 3	-			
36	Lateral 8+100 cruce a camino a Chintepec	24	0.12	95	8.7	3.3 x10 <sup>4</sup>	1.3 x10 <sup>4</sup>	2.8 x10 <sup>3</sup>	Tipo 3	-			

Cuadro 2 (continuación). Descripción de las condiciones de temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos, potencial de hidrógeno (pH) y promedio de UFC para coliformes totales, fecales y enterobacterias de los puntos de toma de muestra del Distrito de Riego 023, así como la clasificación de los tipos de agua de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOMCCA-033-ECOL/1993. El guión “-” se empleó para datos que no entran en la clasificación con base en la norma. El signo “x” se empleó para muestras que no presentaron coliformes totales y que no entran dentro de la clasificación de la norma.

Punto	Nombre	Promedio de UFC/100 ml										
		Temperatura (°C)	Conductividad eléctrica (mS/cm)	Sólidos disueltos (ppm)	pH	Coliformes totales	Coliformes fecales	Enterobacterias	Tipo de agua según la carga de coliformes fecales (NOMCCA-033-ECOL/1993)	Tipo de agua según la carga de coliformes totales (NOMCCA-033-ECOL/1993)		
37	Lateral 8+100 (final)	26.7	1.22	880	7.5	1.3 x10 <sup>6</sup>	0	1 x10 <sup>3</sup>	-	-		
38	Canal de llamada bombas “La Valla”	23	1.85	1354	7.5	2.1 x10 <sup>7</sup>	1.3 x10 <sup>6</sup>	4.9 x10 <sup>3</sup>	Tipo 4	-		
39	Dren Lourdes	22.7	1.78	1322	7.6	1.3 x10 <sup>7</sup>	3.6 x10 <sup>6</sup>	9 x10 <sup>3</sup>	Tipo 4	-		
40	Dren Culebra, puente	26.4	1.56	1133	7.6	1.8 x10 <sup>7</sup>	3.3 x10 <sup>5</sup>	3.2 x10 <sup>3</sup>	Tipo 4	-		
41	Obra de toma San Ildelfonso punto 1	15	0.09	73	7.5	0	0	1.2 x10 <sup>3</sup>	-	x		
42	Obra de toma San Ildelfonso punto 2	15.2	0.09	66	7.8	1.6 x10 <sup>3</sup>	0	6 x10 <sup>2</sup>	-	-		
43	Vaso de la presa San Ildelfonso	21.1	6.1	79	8.6	8.7 x10 <sup>4</sup>	3.5 x10 <sup>4</sup>	1.2 x10 <sup>4</sup>	Tipo 3	-		
44	La Cascada Ñado	17.4	0.17	130	7.4	3.6 x10 <sup>3</sup>	0	2.4 x10 <sup>3</sup>	-	-		
45	Río Prieto	21.7	0.06	47	7.3	8.3 x10 <sup>3</sup>	0	3.1 x10 <sup>3</sup>	-	-		
46	Brazo izquierdo río San Juan	22	5.15	10000	8.6	9.7 x10 <sup>4</sup>	3.3 x10 <sup>3</sup>	1.4 x10 <sup>4</sup>	Tipo 3	-		
47	Descarga de planta tratadora San Pedro 2	28.5	2.41	1720	7.5	7.8 x10 <sup>6</sup>	4.1 x10 <sup>6</sup>	9.5 x10 <sup>3</sup>	Tipo 4	-		
48	Aguas debajo de la descarga San Pedro 1	27	2.73	10000	7.7	1.4 x10 <sup>8</sup>	4.1 x10 <sup>7</sup>	4.1 x10 <sup>3</sup>	Tipo 4	-		
49	Descarga municipal San Pedro 1	27.6	7.58	10000	7.5	8.4 x10 <sup>6</sup>	4.2 x10 <sup>6</sup>	3.8 x10 <sup>4</sup>	Tipo 4	-		
50	Descarga Ponderosa	27.8	2.2	1644	7.5	3.7 x10 <sup>6</sup>	1.7 x10 <sup>6</sup>	3.8 x10 <sup>3</sup>	Tipo 4	-		
51	Antes de las descargas	26.5	4.7	10000	7.9	5.2 x10 <sup>7</sup>	2.1 x10 <sup>7</sup>	6.5 x10 <sup>3</sup>	Tipo 4	-		
52	Río San Juan	28.2	2.98	10000	7.3	7.9 x10 <sup>6</sup>	5.6 x10 <sup>6</sup>	2.7 x10 <sup>3</sup>	Tipo 4	-		
53	Canal lateral 2+607 después del pozo 27	25.2	0.13	98	8.2	6.3 x10 <sup>4</sup>	5.3 x10 <sup>3</sup>	1 x10 <sup>4</sup>	Tipo 3	-		

cantidad de coliformes fecales, con  $1.73 \times 10^6$  UFC en 100 ml.

La calidad del agua de las presas se rige bajo el límite indicado por la Ley Federal de Derechos y Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2015. Se tomó muestra de cinco presas en el Distrito de Riego 023 (figura 3) y en todos los casos las cantidades de coliformes fecales se encuentran por encima del límite máximo permisible; la presa Constitución 1917 es el punto con la menor cantidad de coliformes fecales, aunque se está justo en el límite máximo

permitido (1 000 UFC/100 ml). El punto con la mayor cantidad de coliformes fecales corresponde a la presa La Llave, con  $1.73 \times 10^6$  UFC/100 ml (figura 3).

De los cuatros puntos correspondientes a represas, dos sobrepasaron el límite máximo permisible de coliformes fecales. La cantidad máxima de coliformes fecales para represas fue de  $3 \times 10^3$  UFC/100 ml, mientras que los puntos correspondientes al desarenador Constitución 1857 y presa radial 9 no presentaron crecimiento de coliformes fecales.

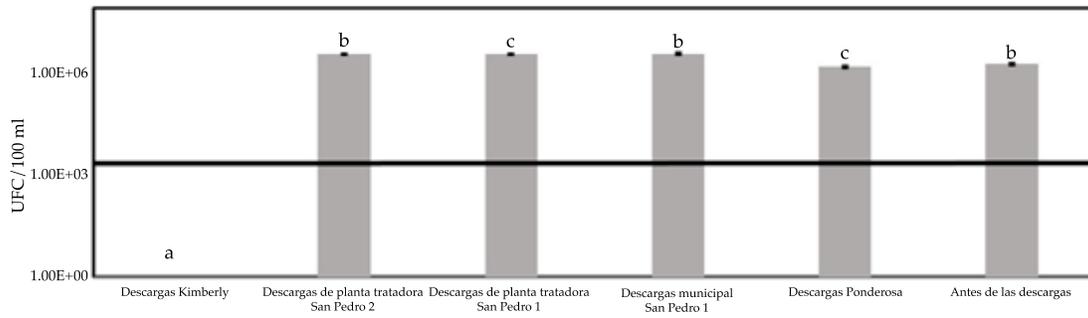


Figura 2. Recuento de UFC de coliformes fecales en agua de descargas del Distrito de Riego 023. La línea negra representa el límite máximo permitido de coliformes fecales (2 000 en cada 100 ml como NMP equivalente a UFC) establecido por la norma NOM-001-Semarnat-1996. El gráfico está representado en escala logarítmica a, b, c. Las letras iguales indican que las muestras son estadísticamente iguales ( $P < 0.05$ ).

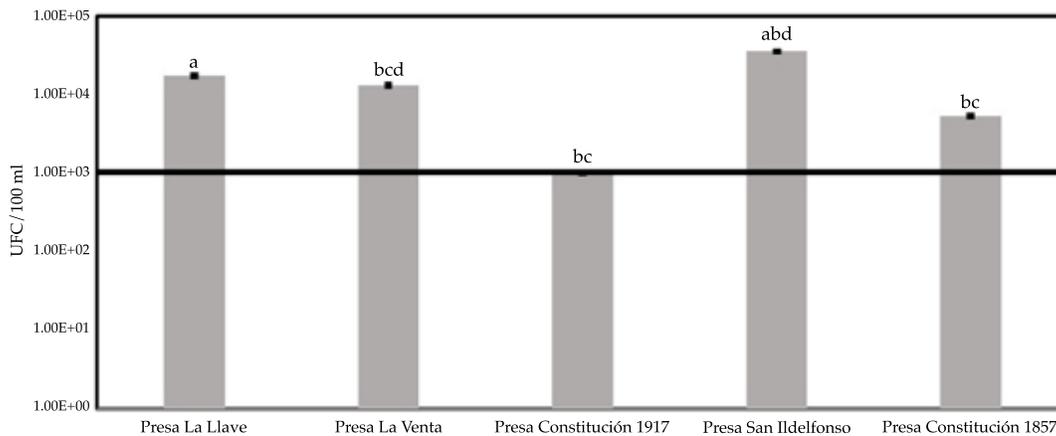


Figura 3. Recuento de UFC de coliformes fecales en agua de presas del Distrito de Riego 023. La línea negra representa el número máximo permitido de coliformes fecales (1 000/100ml como NMP equivalente a UFC) establecido por la Ley Federal de Derechos y Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2015. El gráfico está en escala logarítmica a, b, c, d. Las letras iguales indican que las muestras son estadísticamente iguales ( $P < 0.05$ ).

Se tomó muestra en tres puntos de dos obras de toma en el DR 023 (cuadro 2). De éstas, la obra de toma de la presa La Venta sobrepasó el límite indicado por la Ley Federal de Derechos y Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2015, con  $3.3 \times 10^3$  UFC en 100 ml de agua.

Se tomó muestra de dos sublaterales (cuadro 2) y ambos sobrepasaron el límite correspondiente de coliformes fecales, siendo el sublateral 9+500 el punto con la mayor cantidad de coliformes fecales, con  $30.6 \times 10^3$  UFC/100 ml. Dentro del DR 023, los tres canales laterales muestreados presentaron crecimiento de coliformes fecales por encima del límite permitido (cuadro 2). El canal lateral con la mayor cantidad de coliformes fecales es el canal lateral 2+607, mientras que el canal lateral Kimberly se encuentra justo en el límite máximo de coliformes fecales (1 000 UFC/100 ml).

Se tomó muestra de dos puntos distintos del río San Juan (figura 4), y en ambos puntos se superó el límite máximo permisible de bacterias coliformes fecales que indica la norma, con  $5.66 \times 10^6$  UFC/100 ml. El brazo izquierdo del río San Juan presentó mucho menos coliformes fecales, pero aun así superó el límite con  $3.33 \times 10^3$  UFC/100 ml.

Adicionalmente, se tomó muestra de nueve drenes del DR 023 (cuadro 2). Debido a su procedencia, este tipo de agua no se rige bajo ninguna norma que indique límite alguno de coliformes fecales, sin embargo, casi todos, con excepción del tanque amortiguador del dren Caracol, presentaron elevadas cantidades de coliformes fecales, mientras que el punto donde se obtuvieron más coliformes fecales fue el dren Culebra, con  $22.66 \times 10^6$  UFC/100 ml.

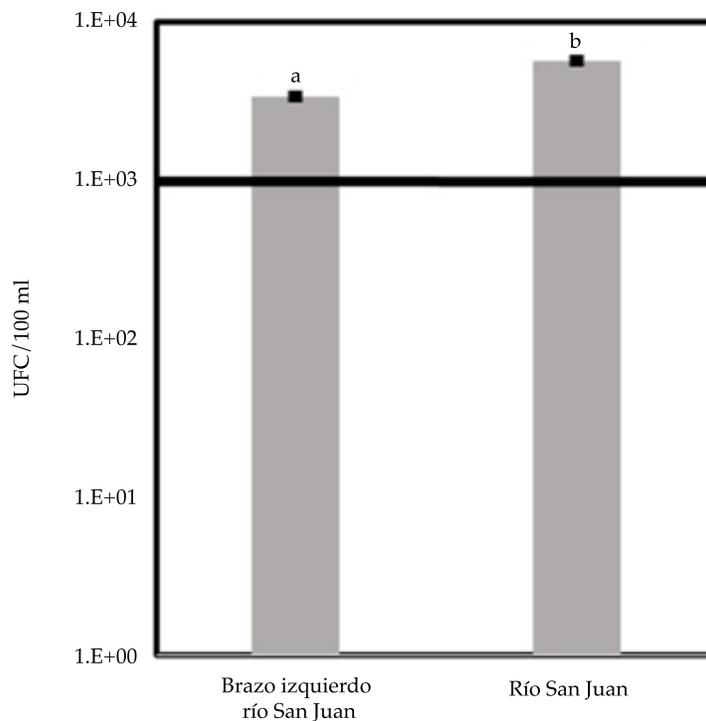


Figura 4. Recuento de UFC en agua de diferentes puntos del río San Juan del Distrito de Riego 023. La línea negra representa el número máximo permisible de coliformes fecales (1 000/100 ml como NMP equivalente a UFC) establecido por la Ley Federal de Derechos y Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2015, a, b. Las letras iguales indican que las muestras son estadísticamente iguales ( $P < 0.05$ ).

Por otra parte, el agua de laterales (cuadro 2) tuvo resultados contrastantes con respecto a los resultados del conteo de UFC, ya que sólo el agua del lateral 8+100 final no presentó coliformes fecales (cuadro 2). Todos los laterales restantes presentaron una gran cantidad de UFC que excedió el límite marcado por la Ley Federal, de Derechos y Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2015, siendo el lateral 8+705 puente el punto con más coliformes, con  $21.66 \times 10^6$  UFC por cada 100 ml. Tres canales principales fueron muestreados en el Distrito de Riego 023 (10) sobre estos dos puntos; el canal de llamada bombas "La Valla" y el canal de descarga Kimberly sobrepasaron el límite establecido por la Ley Federal de Derechos y Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2015, con  $1.33 \times 10^6$  y  $4 \times 10^3$  UFC/100 ml, respectivamente. En el caso del otro canal principal, la estación de aforo Lomo de Toro no se presentó crecimiento de bacterias coliformes fecales.

## Discusión

Debido a las condiciones áridas de México se ha emplazado al uso de cualquier fuente de agua económica y eficaz para promover el desarrollo en masa de productos agrícolas (Pescod, 1992). Sin embargo, se deben considerar y evaluar determinadas variables fisicoquímicas, como pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y temperatura, para poder avalar el uso de distintas fuentes de agua, ya que éstas influyen en la supervivencia de microorganismos en el agua (Ayers & Westcost, 1994; Medema *et al.*, 2013). De acuerdo con Pescod (1992), y Ayers y Westcost (1994), el intervalo ideal del agua de riego respecto al pH oscila entre 6.5 a 8.4; con base en ello, el agua de la mayoría de los sitios muestreados es ideal para el crecimiento de hortalizas, a excepción de siete puntos: sublateral 2+407 camino a Chintepec; presa La Venta; lateral 8+705 puente; canal lateral 13+103 (final) pozo 38; lateral 8+100 cruce a camino a Chintepec; vaso de la presa San Ildelfonso, y el brazo izquierdo río San Juan. Los puntos como

la obra de toma de la presa Constitución 1917, presa Constitución 1857, obra de toma de la presa La Venta, canal lateral 2+607 después del pozo 27 están próximos a alcanzar y superar el nivel establecido. En México, la Ley Federal de Derechos y Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2015 indica un valor máximo de nueve unidades, por lo que bajo este límite el agua de la presa La Venta y el sublateral 2+407 camino a Chintepec no son viables para el riego de cultivos. En el caso del agua de las descargas que se rigen con otro valor límite de pH, ningún sitio superó los límites establecidos por la NOM-001-Semarnat-1996.

Los sólidos disueltos totales (SDT) es una variable que indica el valor de los compuestos inorgánicos y orgánicos en cuerpos de agua (Fipps, 2003), muchos de los cuales son aprovechados por los microorganismos para poder proliferar y desarrollarse. De manera general, la Ley Federal de Derechos y Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2015 indica un valor para SDT de 500 ppm en agua destinada al riego agrícola. Con base en esto, en el DR 023 existen 13 sitios, entre los que resaltan el río San Juan, brazo izquierdo del río San Juan, aguas debajo de la descarga San Pedro 1, descarga municipal San Pedro 1 y antes de las descargas, descarga de la planta tratadora San Pedro 2, descarga Ponderosa, canal de llamada bombas La Valla. Fipps (2003) clasificó el posible uso del agua de riego con base en la cantidad de SDT y a partir de ello, el agua de los 13 puntos mencionados anteriormente se clasifican como permisible (525-1 400 ppm), dudosa (1 400-2 100) e inadecuada ( $\geq 2 100$ ) para ser utilizada en el riego. Ayers y Westcost (1994) también contemplan valores similares a Fipps (2003), pero con una diferente clasificación, pues en este caso indica valores de restricción del agua para ser utilizada en el riego; con base en esto se restringe severamente el uso del agua del brazo izquierdo del río San Juan, aguas debajo de la descarga San Pedro 1, descarga municipal San Pedro 1, antes de las descargas y el río San Juan debido a que superan los 2 000 mg/l. Los valores elevados de SDT en estos puntos pueden

deberse a la adición de contaminantes, lo que conlleva a descartar el uso de esta agua para el riego de hortalizas. Aunque dichas clasificaciones descartan el uso de determinadas fuentes de agua para el riego agrícola, ésta puede ser flexible en caso de considerar cultivos osmotolerantes como los que indica Fipps (2003). De igual manera, el acuerdo CE-CCA-001/89 señala esta flexibilidad en el uso de agua con niveles de sólidos disueltos totales superiores a 500 mg/l.

La conductividad eléctrica es otra medida que se emplea como indicador, en conjunto con otros parámetros, como sólidos disueltos totales o la adsorción de sodio, y de la salinidad del agua (Olías, Cerón, & Fernández, 2015; Sarabia-Meléndez et al., 2011). El alto contenido de sales en el agua reduce la productividad agrícola, al afectar a cultivos sensibles como frijol y fresa, entre otros; además de deteriorar la calidad del suelo (González-Barrios, Calderón-Villegas, Villa-Castorena, Inzunza-Ibarra, & Catalán-Valencia, 2014). De acuerdo con los resultados generados en este estudio, la medición de la conductividad eléctrica en la descarga municipal San Pedro 1 fue la más alta con 7580  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , en comparación con los otros 52 puntos de toma de muestra. A partir de la propuesta de Olías, Cerón y Fernández (2015) sobre la clasificación del laboratorio de salinidad de Estados Unidos (USLS, por sus siglas en inglés) que define cuatro clases de riesgo de salinización, las muestras de la descarga municipal San Pedro 1, vaso de la presa San Ildelfonso, brazo izquierdo del río San Juan y el punto antes de las descargas se encuentran en la categoría “muy alto” para el riesgo de salinidad, en donde se agrupan las mediciones superiores a 3 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Olías et al., 2005). Fipps clasifica al agua de riego como excelente, buena, permisible, dudosa e inadecuada con base en la medición obtenida de conductividad eléctrica en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . De la misma forma, los puntos antes mencionados son clasificados como agua para riego inadecuada, pues exceden los 3 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , por lo que el agua de estos puntos no es adecuada para el riego por sus altos niveles de salinidad.

Los puntos correspondientes a la descarga de la planta tratadora San Pedro 2, aguas debajo de la descarga San Pedro 1, descarga Ponderosa y el río San Juan se clasifican como agua dudosa, al tener de 2 000 a 3 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (clasificación de Fipps); en la clasificación del USLS modificada, estos puntos tienen un riesgo de salinidad alto, al tener de 1 500 a 3 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Como se mencionó en los resultados, la temperatura mínima y máxima en los cuerpos de agua fueron de 15 y 30 °C, respectivamente; la variabilidad de temperaturas obtenidas en los sitios pudieron deberse a la hora en que se realizó la toma de muestra, pues se sabe que la temperatura del agua está correlacionada con la hora del día y el mes (Zheng, 2017). Sin embargo, dichos autores refieren que esto no es relevante en la capacidad de supervivencia y en las tasas de proliferación de microorganismos coliformes fecales (Lessard & Sieburth, 1983; Rozen & Belkin, 2001; Cabral, 2010), por ejemplo, en el estudio de Davies y Evison (1991) no se encontraron diferencias en la tasa de supervivencia de *Salmonella Montevideo* a 5, 15 y 25 °C.

Los datos obtenidos respecto a la carga de coliformes fecales se compararon con los límites estipulados por la Ley Federal de Derechos y Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2015 y la NOM-001-Semarnat-1996. A pesar de que los límites establecidos están indicados con la unidad de número más probable (NMP), diversos estudios indican la equivalencia entre el NMP y las UFC empleadas en este estudio (California Regional Water Quality Control Board-San Francisco Bay Region, n.d.; Kougioulis, 2014; Office of Water Quality, 2006). De acuerdo con los resultados, 41 de los 53 puntos de los que se obtuvo muestra de agua presentaron un alto grado de contaminación biológica con respecto a la carga de coliformes fecales, que fue mayor a lo que indican las normas de referencia empleadas en este estudio.

Las aguas residuales municipales son las principales causas que afectan la calidad de cuerpos de agua y suelos debido a que la mayoría de las veces se descargan sin haber sido tratadas, o no se realiza el tratamiento adecuado

(Cervantes-Zepeda, Cruz-Colín, Aguilar-Corona, Castilla-Hernández, & Meraz-Rodríguez, 2011), como es el caso de las muestras que se obtuvieron de las diferentes descargas del DR 023, pues son muestras de agua tratada que no cumplen con los requerimientos establecidos en la NOM-001-Semarnat-1996 (figura 2). La única muestra que cumplió con lo que establece la norma fue la descarga Kimberly, que no presentó coliformes fecales. Tales resultados demuestran que estas aguas representan un riesgo potencial para la salud debido a que el agua contaminada y su mal tratamiento incrementa el riesgo de adquirir enfermedades como diarrea, cólera, disentería, hepatitis A y poliomielitis, entre muchas otras (OMS-Agua, n.f.). Por lo anterior, es indispensable que las aguas residuales reciban el tratamiento adecuado que garantice los requerimientos mínimos de calidad, para evitar la contaminación de ríos y presas. Contrario a lo que mencionan Cisneros-Estrada y Castanedo-Guerra (2014), las plantas tratadoras San Pedro I y San Pedro II no cumplen con los límites máximos permisibles por la NOM-001-Semarnat-1996 en cuanto al número de UFC de coliformes fecales, por lo que el uso de estas aguas para su uso agrícola no es recomendable.

La mayoría de las presas sobrepasa el límite máximo permisible, con excepción de la presa Constitución 1917 (figura 3), esto es preocupante debido a que no se sabe cuál es la fuente de contaminación en dichas presas; es probable que haya descargas clandestinas que provoquen dicha contaminación. En el caso de la presa San Ildelfonso, la muestra que corresponde al vaso tiene niveles muy altos de UFC (figura 3); sin embargo, las muestras que corresponden a la obra de toma no presentan UFC (cuadro 2). Esto quizá se deba a que los coliformes fecales se encuentran en la superficie y no en zonas profundas, pues no resisten mucho tiempo en el agua y requieren de condiciones muy específicas para su supervivencia (Madigan *et al.*, 2004), y el agua liberada en la obra de toma es de la parte profunda de la presa San Ildelfonso. Las muestras que corresponden al río San Juan

presentan niveles muy altos de contaminación, lo cual concuerda con reportes anteriores (De la Llata-Gómez, Rivera-Sánchez, Valtierra, Martínez-Reséndiz, & Montoya-Martínez, 2006), por lo que existe evidencia de contaminación biológica en el río San Juan y, además, existen reportes no sólo de contaminación biológica, sino también química, por lo que el uso de esta agua representa un riesgo para los habitantes de la zona (De la Llata-Gómez *et al.*, 2006).

Es probable que en toda la red de distribución del DR 023 haya contaminación provocada por descargas clandestinas de las casas aledañas de la zona o de los establecimientos cercanos, como es el caso de invernaderos o fábricas, debido a que hay una variación en los niveles de contaminación por UFC de coliformes fecales, como se puede observar en las muestras que corresponden a las represas, sublaterales, laterales y canales principales; por ejemplo, el lateral 8+100 presentó niveles altos de coliformes y en la muestra que pertenece a la parte final del mismo no hubo presencia de coliformes, por lo que se sugiere que sólo hay una fuente de contaminación cercana al principio del lateral, sin embargo, cuando se realizó el muestreo, dicha fuente no fue detectada. Se tomaron muestras de drenes para hacer una comparación de los niveles de contaminación de aguas, que en teoría deberían estar tratadas y de aguas no tratadas, como es el caso de los drenes (cuadro 2); sin embargo, en el tanque amortiguador dren Caracol no se encontró la presencia de UFC de coliformes fecales, esto quizá se deba al lugar en el que se tomó la muestra.

## Conclusión

Los datos fisicoquímicos y bacteriológicos del agua del DR 023 provee información sobre la calidad de la misma. Se recomienda un monitoreo constante de los parámetros presentados, incluyendo la carga de coliformes, para poder avalar el uso de determinadas fuentes de agua para el riego de cultivos en la región, así como una supervisión más estricta de las operaciones de las plantas de tratamiento de aguas residuales

debido a la elevada carga de coliformes fecales presentes en el agua de estas plantas del DR 023. La mala calidad del agua se debe a la presencia de fuentes de contaminación por descargas clandestinas, como casas aleaños, invernaderos y fábricas, así como al tratamiento inadecuado de las aguas que provienen de las plantas tratadoras de la zona, que alteran la calidad del agua para riego y nos alertan sobre el riesgo que corre la salud de la población que utiliza tales aguas; se puedan dar recomendaciones para evitar sembrar cultivos como hortalizas, que puedan infectarse por este tipo de aguas y que sean potencialmente dañinas para la población.

## Agradecimientos

Al personal del Distrito de Riego 023, San Juan del Río, por su apoyo incondicional durante la toma de muestras: ingenieros Manuel Carrillo Mendoza y Yonatan Manjarrez, así como al señor Marcelino Morales. Al doctor José Antonio Cervantes Chávez por el espacio durante la realización de este proyecto y por permitirnos hacer uso del equipo para los análisis bacterianos. Finalmente se agradecen las sugerencias realizadas por los revisores, que sin duda mejoraron la calidad de este trabajo.

## Referencias

- 3M Microbiology (2003). *3M TM Petrifilm TM placas para recuento de aerobios. 3M TM Petrifilm TM. Guía de Interpretación*. St. Paul, USA: 3M Microbiology.
- Ahumada-Santos, Y. P., Báez-Flores, M. E., Díaz-Camacho, S. P., Uribe-Beltrán, M. de J., López-Angulo, G. et al. (2014). Spatiotemporal distribution of the bacterial contamination of agricultural and domestic wastewater discharged to a drainage ditch (Sinaloa, Mexico). *Ciencias Marinas*, 40(4), 277-289.
- Ayers, R. S., & Westcott, D. W. (1994). Water quality evaluation. *Water Quality for Agriculture*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Bonilla, M. N., Ayala-Osorio, A. I., González-Contreras, S., Santamaría-Juárez, J. D., & Silva-Gómez, S. E. (2016). Calidad fisicoquímica del agua del distrito de riego 030 "Valsequillo" para riego agrícola. *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*, 2(3), 1-29.
- Cabral, J. (2010). Water microbiology. Bacterial pathogens and water. *Int. J. Environ. Res. Public. Health*, 7(10), 3657-3703.
- California Regional Water Quality Control Board-San Francisco Bay Region. (n.d.). *Pathogens in the Napa River watershed total maximum daily load (TMDL)*. No. 510/622-2382. San Francisco, USA: California Environmental Protection Agency.
- Cervantes-Zepeda, A. I., Cruz-Colín, M. R., Aguilar-Corona, R., Castilla-Hernández, P., & Meraz-Rodríguez, M. (2011). Caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua tratada en un reactor UASB escala piloto. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(1), 67-77.
- Cifuentes, E., Blumenthal, U., Ruíz-Palacios, G., Bennett, S., & Peasey, A. (1994). Escenario Epidemiológico del uso agrícola del agua residual: el valle del Mezquital, México. *Salud Pública Méx.*, 36(1), 3-9.
- Cisneros-Estrada, O. X., & Castanedo-Guerra, L. V. (2014). Propuesta para integrar aguas residuales tratadas al riego agrícola en el Distrito de Riego 023. *XXIII Congreso Nacional de Hidráulica*, 1(1), 127-131.
- Conagua (2013). *Estadísticas del agua en México*. Vol. 1. México, DF: Coordinación General de Comunicación y Cultura del Agua de la Comisión Nacional del Agua.
- Conagua (2014a). *Estadísticas del agua en México*. Vol. 1. México, DF: Coordinación General de Comunicación y Cultura del Agua de la Comisión Nacional del Agua.
- Conagua (2014b). *Atlas del agua en México* (2014th ed.), vol. 1. México D.F.: Coordinación General de Comunicación y Cultura del Agua de la Comisión Nacional del Agua.
- Davies, C., & Evison, L. (1991). Sunlight and the survival of enteric bacteria in natural waters. *Journal of Applied Microbiology*, 3(70), 265-274.
- De la Llata-Gómez, R., Rivera-Sánchez, E., Valtierra, G. J., Martínez-Reséndiz, W. E., & Montoya-Martínez, A. (2006). *Caracterización de los ecosistemas, cambios en el uso de suelo y unidades paisajísticas en la reserva de la biosfera "Sierra Gorda" de Querétaro*. Querétaro: Concyteq.
- Fipps, G. (2003). Irrigation water quality standards and salinity management strategies. College Station, TX, Publication Number B-1667. *Texas A&M Agrilife Extension*: Texas, USA: Texas A&M Uni. Publication. Collegue Satation.
- González-Barrios, J. L., Calderón-Villegas, U., Villacastorena, M., Inzunza-Ibarra, M. A., & Catalán-Valencia, E. A. (2014). Impacto de la salinidad del agua de riego en la calidad del fruto de chile jalapeño. *Agrofaz*, 14(2), 61-66.
- Hernández-Acosta, E., Quiñones-Aguilar, E. E., Cristóbal-Acevedo, D., & Rubiños-Panta, J. E. (2014). Biological quality of wastewater used in irrigation of forage crops in Tulancingo, Hidalgo, Mexico. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 20(1), 89-100.
- Huibers, F. P., & Van Lier, J. B. (2005). Use of wastewater in agriculture: The water chain approach. *Irrigation and Drainage*, 54(S1), S3-S9.
- Kougioulis, J. (2014). *Triennial Review-Most probable number (MPN)/colony forming units (CFU) enumeration methods and proposed standards reporting revision*. New Mexico, USA: New Mexico Environment Department Resource Protection Division.

- Madigan, M. T., Martinko, J. M., Parker, J., Brock, T. D., Fernández, C. R. et al. (2004). *Brock biología de los microorganismos*. Madrid: Pearson Educación.
- Lessard, E. J., & Sieburth, J. (1983). Survival of natural sewage populations of enteric bacteria in diffusion and batch chambers in the marine environment. *Applied and Environmental Microbiology*, 45(3), 950-959.
- Mazari-Hiriart, M., Ponce-de-León, S., López-Vidal, Y., Islas-Macías, P., Amieva-Fernández, R. I. et al. (2008). Microbiological implications of periurban agriculture and water reuse in Mexico City. Herman, C. (ed.). *PLoS ONE*, 3(5), e2305.
- Medema, G. J., Shaw, S., Waite, M., Snozzi, M., Morreau, A. et al. (2013). Catchment characteristics and source water quality (pp. 111-158). In: *Assessing Microbial Safety of Drinking Water Improving Approaches and Method*. London: WHO & OECD, IWA Publishing.
- Megchún-García, J. V., Landeros-Sánchez, C., Soto-Estrada, A., Castañeda-Chávez, M. R., Martínez-Dávila, J. P. et al. (2015). Total coliforms and *Escherichia coli* in surface and subsurface water from a sugarcane agroecosystem in Veracruz, Mexico. *Journal of Agricultural Science*, 7(6), 110-119.
- Office of Water Quality (2006). *Total maximum daily load for Escherichia coli (E. coli) for the plummer creek watershed, greene county* (pp. 1-12). Indianapolis, USA: Indiana Department of Environmental Management.
- Olías, M., Cerón, J. C., & Fernández, I. (2015). Sobre la utilización de la clasificación de las aguas de riego del U.S. Laboratory Salinity (USLS). *Geogaceta*, 37, 111-113.
- Olivas-Enriquez, E., Flores-Margez, J. P., Serrano-Alamillo, M., Soto-Mejía, E., Iglesias-Olivas, J. et al. (2011). Indicadores fecales y patógenos en agua descargada al río bravo. *Terra Latinoamericana*, 29(4), 449-457.
- OMS-Agua (n.f.). WHO. Consultado el 20 de marzo de 2016. Recuperado de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs391/es/>.
- Pescod, M. (1992). *Wastewater treatment and use in agriculture*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Rozen, Y., & Belkin, S. (2001). Survival of enteric bacteria in seawater. *FEMS Microbiology Reviews*, 25(1), 513-529.
- Saldaña-Fabela, M. del P., Díaz-Pardo, E., & Gutiérrez-Hernández, A. (2011). Diagnóstico de la calidad del agua en un sistema de embalses en cascada, cuenca del río San Juan, Querétaro, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(3), 115-126.
- Sarabia-Meléndez, I. F., Cisneros-Almazán, R., Aceves-de-Alba, J., Durán-García, H. M., & Castro-Larragoitia, J. (2011). Calidad del agua de riego en suelos agrícolas y cultivos del valle de San Luis Potosí, México. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 27(2), 103-113.
- Vázquez-Sánchez, G., & Pineda-López, R. (2010). Propuesta de creación de un área de protección de recursos naturales en la cuenca alimentadora del Distrito de Riego 023 San Juan del Río, Querétaro. *Ciencia@UAQ*, 3(1), 61-70.
- Zheng, H. (2017). Chapter 5: Active solar distiller (pp. 323-446). In: *Solar Energy Desalination Technology*. Zheng, H. (ed.). Beijing: Elsevier.

## Dirección institucional de los autores

Lic. Nami Morales-Durán

Lic. Anaí de la Torre-González

Lic. Víctor García-Sánchez

Universidad Autónoma de Querétaro  
 Facultad de Ciencias Naturales  
 Laboratorio de Microbiología Molecular  
 Avenida de las Ciencias s/n, Col. Juriquilla  
 76230 Querétaro, Querétaro, MÉXICO  
 Teléfono: + (52) (442) 192 1200, ext. 65216  
 nmorales17@alumnos.uaq.mx  
 edelatorre05@alumnos.uaq.mx  
 vgarcia10@alumnos.uaq.mx

Dr. Carlos Chávez

Universidad Autónoma de Querétaro  
 Facultad de Ingeniería  
 Centro de Investigaciones del Agua  
 Cerro de las Campanas s/n, Col. Las Campanas  
 76010 Querétaro, Querétaro, MÉXICO  
 Teléfono: + (52) (442) 192 1200, ext. 6036  
 chagcarlos@uaq.mx



Cañón del Colca, Arequipa, Perú.

Foto: André Steenken y Edwin Pino.

# Evaluación del potencial hidroenergético a pequeña escala en cuencas hidrológicas con un modelo lluvia-escorrentamiento

• Bertha Meza-Prieto\* • Javier Aparicio •  
Universidad Nacional Autónoma de México, Jiutepec, México

\*Autor para correspondencia

DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-05

## Resumen

Meza-Prieto, B., & Aparicio, J. (enero-febrero, 2018). Evaluación del potencial hidroenergético a pequeña escala en cuencas hidrológicas con un modelo lluvia-escorrentamiento. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(1), 69-87, DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-05.

Una manera de impulsar proyectos con base en energías renovables, como los sistemas hidroeléctricos a pequeña escala, es determinando los lugares viables para el emplazamiento de dichos proyectos y la energía que podría explotarse. En este trabajo se expone un método de sencilla aplicación para estimar el potencial hidroenergético en cuencas hidrológicas. La bondad principal del método se debe al empleo de *software* libre para la modelación hidrológica continua. Se utiliza el *software ArcGis 10.1* para realizar la delimitación y el procesamiento cartográfico de las subcuencas hidrológicas y el trazo de perfiles longitudinales de cauces. Los criterios establecidos para la selección de sitios disponibles fueron los siguientes: pendiente del río de al menos 3% y el desnivel topográfico de tres metros o más. Se elige un periodo común de precipitación y caudal medio diario para calibrar y validar el modelo hidrológico semidistribuido *Soil Moisture Accounting (SMA)*. El método SMA es una herramienta adecuada para conocer el caudal medio en cuencas no aforadas. Se encontraron 578 sitios con un potencial hidroenergético bruto de 49.2 MW. La metodología empleada es práctica, porque requiere conocimientos básicos de sistemas de información geográfica y del manejo de *HEC-HMS*. La evaluación económica muestra inversiones iniciales de \$3,672,636.00 pesos mexicanos en promedio. Ante tales costos, puede ser factible invertir, si se considera una planeación a largo plazo. El  $Q_{90}$  es una buena alternativa para el diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas al hilo de agua.

**Palabras clave:** potencial hidroenergético, pequeñas centrales hidroeléctricas (PCHs), modelo *Soil Moisture Accounting (SMA)*, curva de duración de caudales, río Alto Amacuzac.

## Abstract

Meza-Prieto, B., & Aparicio, J. (January-February, 2018). Evaluation of small-scale hydropower potential in watersheds using a rainfall-runoff model. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 9(1), pp. 69-87, DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-05.

One way of promoting renewable energy-based projects, such as the small-scale hydroelectric systems, is to determine viable placements for them, as well as the exploitable energy. This work presents a simple method to estimate the hydropower potential in watersheds. The main advantage of this method is that the continuous hydrological modeling is performed using free software. The delimitation and cartographic processing of the sub basins, as well as the longitudinal profile tracing of the riverbed is performed using the Arcgis 10.1 software. The criteria for the available sites selection were established as: river slope of at least 3%, and vertical drop of 3 meters or more. A common precipitation and average daily flow period is chosen in order to calibrate and validate the Soil Moisture Accounting (SMA) semi-distributed hydrological model. The SMA method is a suitable tool to estimate the mean streamflow in ungauged watersheds. In the Alto Amacuzac River Basin, 578 sites with a gross hydropower potential of 49.2 MW were found. The methodology used is practical because it only needs basic knowledge of geographic information systems and uses HEC-HMS. The economical evaluation shows initial investments of \$3,672,636.00 Mexican pesos on average. With these costs, investments may be feasible as long as a long-term plan is considered. The streamflow  $Q_{90}$  is a good alternative to design run-of-river small hydropower plants.

**Keywords:** Hydropower potential, small hydropower plants, Soil Moisture Accounting (SMA) model, flow-duration curve, Alto Amacuzac River.

Recibido: 09/02/2017

Aceptado: 07/09/2017

## Introducción

La generación de energía hidroeléctrica a pequeña escala es una actividad de gran importancia en el mundo y se ha practicado desde hace más de doscientos años (Fritz, 1984). Además de ser ecológicamente más conveniente (Castro, 2006; APER, 2007), las ventajas económicas de las hidroeléctricas sobre los sistemas de energía térmica son muy considerables, pues el costo de generación es menor comparado tanto con los sistemas de generación eléctrica nuclear como con los que funcionan a partir de combustibles fósiles, como diésel y gas natural (Calderón, 2017).

Una alternativa para las plantas de generación hidroeléctrica a pequeña escala son las construidas al hilo del agua, pues su impacto ambiental es despreciable, comparado con las grandes centrales, las cuales se caracterizan por generar energía de base a todas horas, aunque tienen una carga constante con limitada adaptación a la demanda de energía y no permiten regular las inundaciones ni la variación del flujo en el río (Ortiz, 2011).

El potencial eléctrico de pequeñas y micro centrales hidroeléctricas ha sido evaluado en países como Estados Unidos y Brasil. En Estados Unidos se tiene un potencial de energía total bruto anual en este tipo de centrales de cerca de 171 055 MW, pero sólo están disponibles 101 341 MW. En el caso de Brasil, se estimó un potencial para pequeñas centrales hidroeléctricas de 237 870 MW, de los cuales 4 822 se encuentran en sitios ya desarrollados y 50 231 están en áreas de exclusión, y por tanto sólo pueden utilizarse 182 817 MW (Hall, 2011).

De acuerdo con Alemán *et al.* (2014), en México existen algunas barreras para el desarrollo de energías renovables, entre las que se pueden mencionar: la estrategia energética, que se basa en la evaluación de los recursos de energía renovable a corto plazo y no a largo plazo; la tecnología, por la insuficiente inversión en la exploración de los recursos de energía renovable que no han sido considerados, como los de energía geotérmica y la undimotriz, y en el incremento de la capacidad de transmisión en

áreas con alto potencial de recursos de energía renovable; y los incentivos, pues si bien la Comisión Reguladora de Energía (CRE), la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y la Secretaría de Energía (Sener) de México los ofrecen para estimular la participación del sector privado en la generación de energía de recursos renovables, ello no es suficiente para el desarrollo de todos los esquemas de generación eléctrica.

Por otro lado, la generación por medio de pequeñas hidroeléctricas enfrenta otras barreras, como la falta de evaluación confiable del potencial de generación y la incertidumbre debida a la escasez de información meteorológica e hidrométrica adecuada. Aunado a esto, existe otra limitante en el aprovechamiento de agua para generar electricidad debido a que México tiene grandes zonas áridas y esto lo hace vulnerable a las sequías, según la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2011) por las razones siguientes: a) hay periodos de tiempo en los que disminuye la producción de energía hidroeléctrica por falta de agua; b) el régimen de lluvias sufre alteraciones tanto espaciales como temporales; c) la evapotranspiración se incrementa en los meses de marzo a junio, y d) se deben satisfacer las demandas de agua potable y riego antes que las de energía.

En el caso de generación a gran escala, los sitios aprovechables son limitados en número y éstos no necesariamente serán rentables a largo plazo debido al cambio climático, que producirá una variación temporal en el régimen de lluvias en verano; en efecto, la precipitación podría disminuir en toda la república hasta en 6% en primavera-verano en el periodo 2015-2039 de acuerdo con el escenario RCP4.5 del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IMTA, 2015). Por ello, para usar la energía hidroeléctrica en el futuro, es conveniente realizar una planeación de los recursos a largo plazo, considerando, entre otros aspectos, la generación en pequeña escala, es decir, construyendo pequeñas centrales hidroeléctricas (PCHs).

El objetivo general de este trabajo es proponer un método para la estimación del potencial hidroenergético en cuencas hidrológicas y

localizar los sitios factibles para construir micro, mini y pequeñas centrales hidroeléctricas. Sus objetivos particulares son: 1) implementar, calibrar y evaluar el modelo *Soil Moisture Accounting (SMA)* (Bennett & Peters, 2000) como herramienta para obtener el caudal medio disponible en cuencas hidrológicas para generar energía eléctrica; 2) definir lugares apropiados en las subcuencas del río Alto Amacuzac para construir centrales hidroeléctricas al hilo de agua y calcular su potencial; y 3) realizar la evaluación de los costos aproximados de instalación de una PCH y revisar su factibilidad para un caso específico.

### Metodología

Como parte de la metodología se realiza un análisis cartográfico de las subcuencas hidrológicas mediante el *software ArcGIS 10.1* (ESRI, 2017). Por otro lado, se analiza la información climatológica e hidrométrica, y posteriormente se calibra y valida el modelo hidrológico *SMA* usando el *software HEC-HMS 4*. El programa *HEC-HMS* tiene varias alternativas para la simulación de eventos de lluvia de corta duración y simulación continua. Para determinar el volumen total de agua disponible para

escorrento superficial, el programa cuenta con el modelo *Soil Moisture Accounting (SMA)* en el caso de simulación continua (USACE, 2017). En la figura 1 se muestra el diagrama que ilustra el procedimiento propuesto para evaluar el potencial hidroenergético en cuencas hidrológicas.

### Análisis cartográfico

El análisis cartográfico se realizó a partir del modelo digital de terreno de escala 1:50 000, del conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación, escala 1:250 000 serie IV (INEGI, 2010) y del conjunto nacional de datos vectorial edafológico, escala 1:250 000 serie II (INEGI, 2007), obtenidos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Dicho análisis consistió en determinar las características fisiográficas de las subcuencas y los perfiles longitudinales de las corrientes perennes. Se identificaron los tipos de vegetación y suelo, y los elementos de exclusión.

### Determinación de las características fisiográficas de las subcuencas

El río Amacuzac es un afluente del río Balsas y se origina en las faldas del volcán Nevado

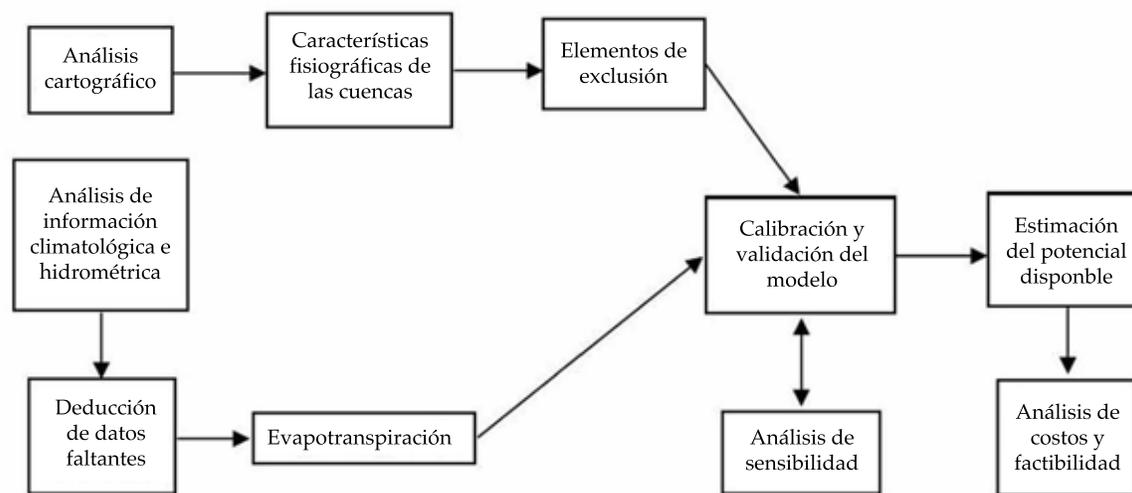


Figura 1. Procedimiento para estimar el potencial disponible y costos.

de Toluca, a una altitud aproximada de 2 600 msnm dentro de San Martín Tequesquipan, Estado de México, en donde se le conoce como río Texcaltitlán. La longitud total del río Amacuzac hasta la confluencia con el río Balsas es de 253 km aproximadamente (IMTA, 2012). El área de estudio se encuentra ubicada en la cuenca río Alto Amacuzac, cuya superficie es de 2 611.98 km<sup>2</sup>, dentro de la cual se encuentran los ríos principales Texcaltitlán, Chontalcuatlán y San Jerónimo (INEGI, 2017).

Se definieron los sitios propicios para construir pequeñas centrales hidroeléctricas en esta cuenca considerando los siguientes criterios: 1) la pendiente del tramo de río debe ser por lo menos de 0.03 (3 %) debido a la resolución del modelo digital de terreno; y 2) un desnivel mínimo por tramo de tres metros debido a que las turbinas comerciales funcionan con más de dos metros de carga (Ortiz, 2011). Posteriormente se delimitaron las subcuencas y se obtuvieron sus características principales, como área, longitud del cauce principal, pendiente media del cauce principal y tiempo de concentración necesarias para el uso del modelo SMA.

#### *Determinación de perfiles longitudinales*

Se trazaron los perfiles longitudinales de las corrientes tributarias que coincidían con las corrientes perennes de las subcuencas hidrológicas (INEGI, 2017), con el fin de determinar el desnivel topográfico y la distancia horizontal del cauce, y luego calcular una pendiente media. En la figura 2 se muestra un perfil tipo obtenido con la herramienta *3D-Analyst*. Para ello se convierten los perfiles en 2D a 3D utilizando la rutina siguiente: *ArcToolbox-3D Analyst Tools-Functional Surface-Interpolate Shape*.

#### *Identificación de los tipos de vegetación y suelo*

Se determinaron el tipo de vegetación y tipo de suelo en el área de estudio para definir el valor de los parámetros iniciales que dependen de las características geomorfológicas de las cuencas, tomando como base los reportados en otros trabajos. En la figura 3 se muestra el tipo de vegetación característica y uso de suelo de la cuenca Alto Amacuzac. El tipo de suelo dominante de acuerdo con la clasificación

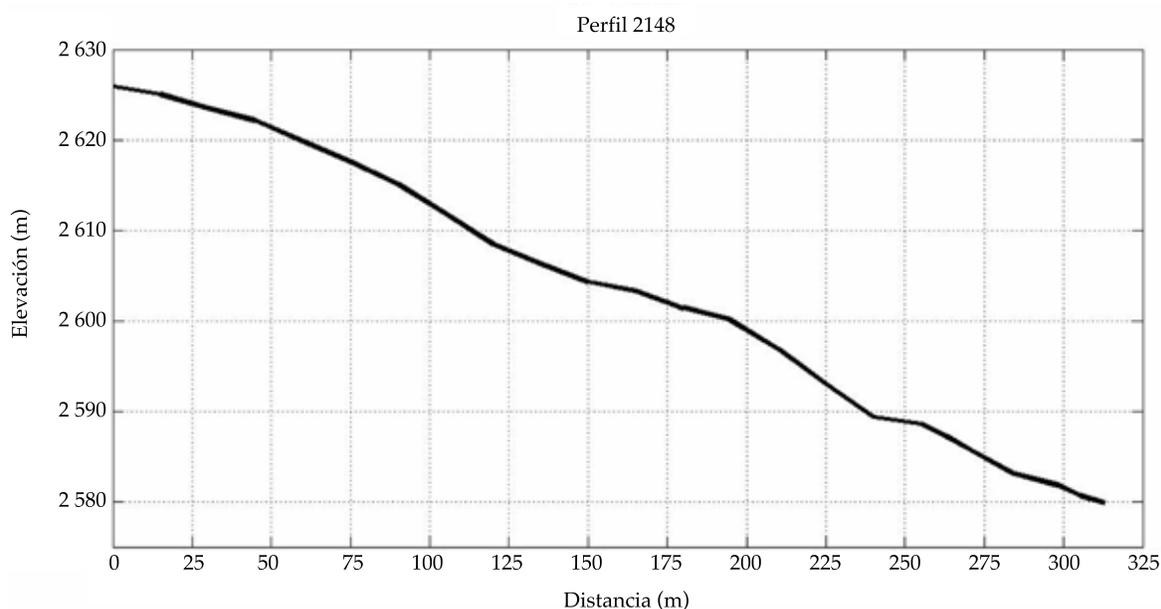


Figura 2. Perfil longitudinal del cauce principal del río Amacuzac.

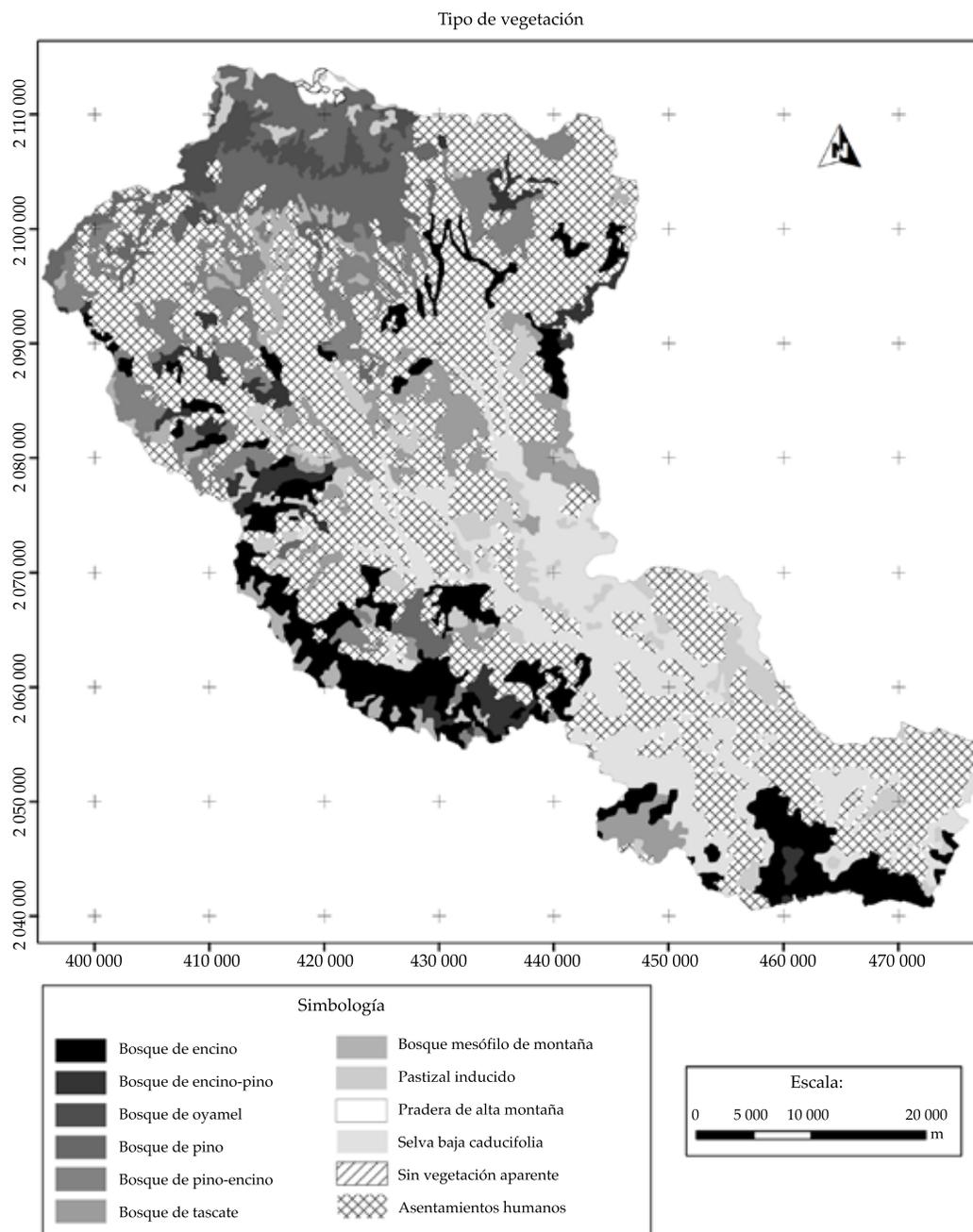


Figura 3. Tipo de vegetación y uso de suelo. Fuente: elaboración propia con datos de INEGI.

del Servicio de Conservación de Recursos Naturales de Estados Unidos —antes Soil Conservation Service (SCS) (Aparicio, 2010)— se obtuvo a partir de la información edafológica digital con clases de textura 1, 2 y 3 (INEGI,

2004). En la figura 4 se presenta la ubicación de los tipos de suelos principales en la cuenca Alto Amacuzac. La clase NA corresponde a las áreas donde están ubicadas las manchas urbanas.

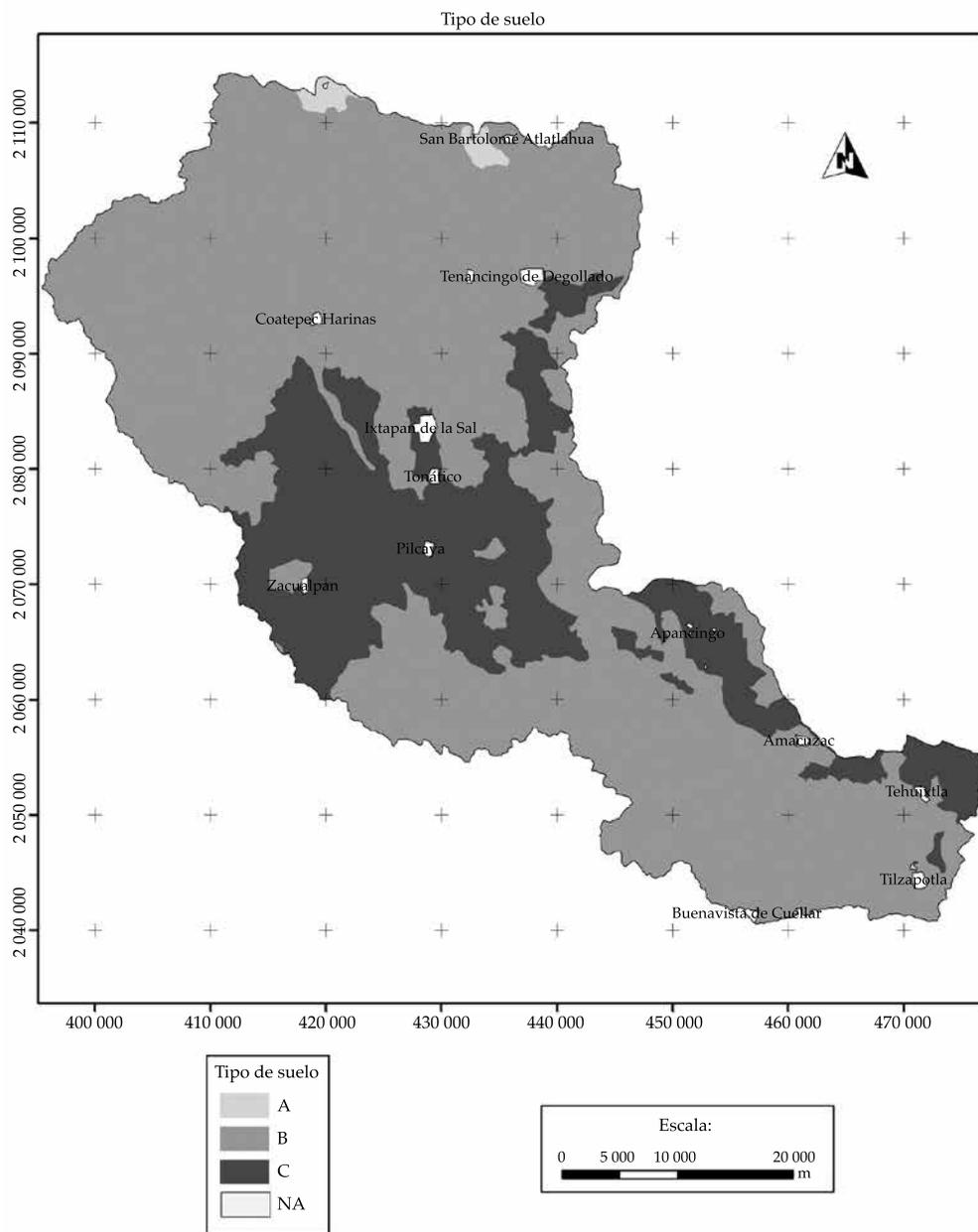


Figura 4. Tipo de suelo y área urbana. Fuente: elaboración propia con datos de INEGI.

### Ubicación de los elementos de exclusión

Como elementos de exclusión se consideran las superficies en las que no se puede aprovechar el agua para generación hidroeléctrica, por ejemplo las áreas protegidas, proyectos de obras existentes, zonas con baja precipitación y cuando el uso de suelo no lo permite, como

en el caso de áreas urbanas o agrícolas. En la figura 5 se muestra el área urbana, infraestructura existente y las áreas naturales protegidas pertenecientes a los parques nacionales Nevado de Toluca y Desierto de Carmen o de Nixcongo, así como el Parque Estatal Santuario del Agua Temascaltepec, ubicados dentro de la cuenca Alto Amacuzac.

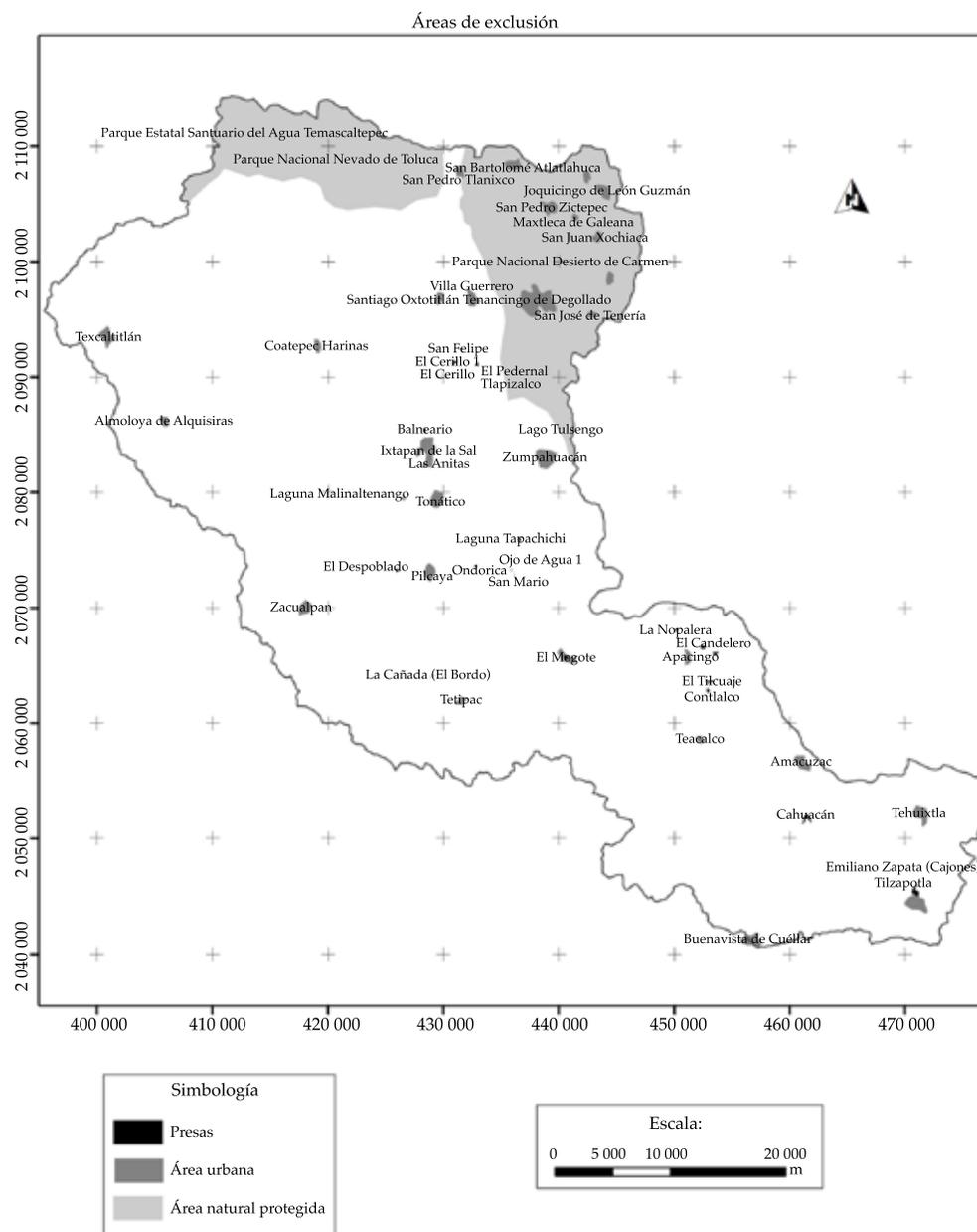


Figura 5. Ubicación de las áreas naturales protegidas y área urbana. Fuente: elaboración propia con datos de INEGI.

### *Análisis de información climatológica e hidrométrica*

Para realizar el análisis de la información climatológica se utilizaron los datos registrados en la base de datos climatológica nacional CLICOM del Servicio Meteorológico Nacional, con información de precipitación hasta el año

2012 (Conagua, 2017). La información hidrométrica se obtuvo del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (Bandas) de la Red Hidrométrica Nacional, actualizado por Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2012). Asimismo, se obtuvo la evapotranspiración mensual con el método Blaney-Criddle (Aparicio, 2010), ya que éste utiliza datos disponibles,

como temperatura media mensual y horas de sol mensual. Se definió un periodo común de al menos 12 años de datos registrados de precipitación y caudal medio diario para usar en la calibración y validación del modelo SMA, pues se consideró el criterio tomado en la calibración y validación del modelo SMA en HEC-HMS, en el que se calibró el modelo con un periodo de datos de caudal de cuatro años, menor al usado en la validación de siete años.

#### *Revisión de información climatológica*

Se trazaron los polígonos de Thiessen (Aparicio, 2010) mediante el *software ArcMap* para obtener el área de influencia fija de cada estación climatológica necesaria para asignar un peso espacial a la precipitación registrada en el modelo meteorológico del *software HEC-HMS*. El uso de polígonos de Thiessen permite determinar áreas de influencia de las estaciones climatológicas para varias cuencas a la vez. Para esto se utilizaron 23 estaciones climatológicas, de las cuales cinco están ubicadas en Morelos, 14 en el Estado de México y cuatro en Guerrero. Se revisaron los datos de precipitación diaria y se dedujeron los datos faltantes para completar las series de datos históricos diarios de acuerdo con Aparicio (2010). Se encontraron más datos faltantes en el periodo 1991-2006 utilizados para realizar la validación de los parámetros en la cuenca Chontalcuatlán, pues de las nueve estaciones climatológicas, cuatro presentaron gran porosidad; por ejemplo, en Meyuca faltaban 12 meses de información diaria; en San Fco. Oxtotilpan, 20 meses; en Coatepec Harinas, 33 meses y en Nevado de Toluca faltaban nueve meses. En la estación Troja Vieja se determinaron los datos faltantes de dos meses; en Coatepequito y Dos Bocas se rellenaron dos meses de precipitación diaria, y en El Mirador un mes. En la mayoría de los casos se estimaron los datos faltantes de los meses menos lluviosos y en todos los casos se observó una correlación lógica en los datos de precipitación mensual.

#### *Análisis de caudales medios diarios*

Para hacer el análisis se emplearon cinco estaciones hidrométricas ubicadas en la cuenca Alto Amacuzac, sobre los cauces de los ríos Amacuzac, San Jerónimo, Chontalcuatlán y Texcaltitlán. No existen reglas generales para seleccionar los periodos de calibración y validación, pero algunos autores (*e.g.*, Bottcher, Whiteley, James, & Hiscock, 2012) recomiendan que el periodo de validación sea al menos del doble que el de calibración. En los casos de las cuencas Texcaltitlán y Chontalcuatlán se usaron cuatro años de datos históricos de caudales diarios, así como 8 y 16 años, respectivamente, para la validación; los parámetros para la cuenca Coatepequito se calibraron con cinco años y se validaron con 20 años de registros, y los parámetros para las cuencas Dos Bocas y Amacuzac se calibraron con seis años y se validaron con 16 años de registros de datos diarios. Esto se hizo con el fin de utilizar los datos de precipitación empleados en la validación de los parámetros, para hacer la simulación en las subcuencas hidrológicas, pues, como Ortiz (2011) menciona, las curvas de duración de caudales y de frecuencias se deben obtener con la información histórica existente superior a 10 años preferiblemente en el caso de PCHs.

En la figura 6 se muestra la ubicación de las estaciones climatológicas e hidrométricas utilizadas para el análisis y los polígonos de Thiessen trazados. El nombre de la cuenca hidrológica se asignó de acuerdo con el nombre de la estación hidrométrica de aforo.

#### **Calibración y validación del modelo hidrológico**

El modelo hidrológico está constituido por tres etapas de cálculo. En la primera se determina el flujo del agua de precipitación con el modelo SMA, ya sea que se evapotranspire, se infiltre, percole o escurra. Luego se utiliza el modelo de Clark para representar la transformación de la precipitación en exceso en escurrimiento

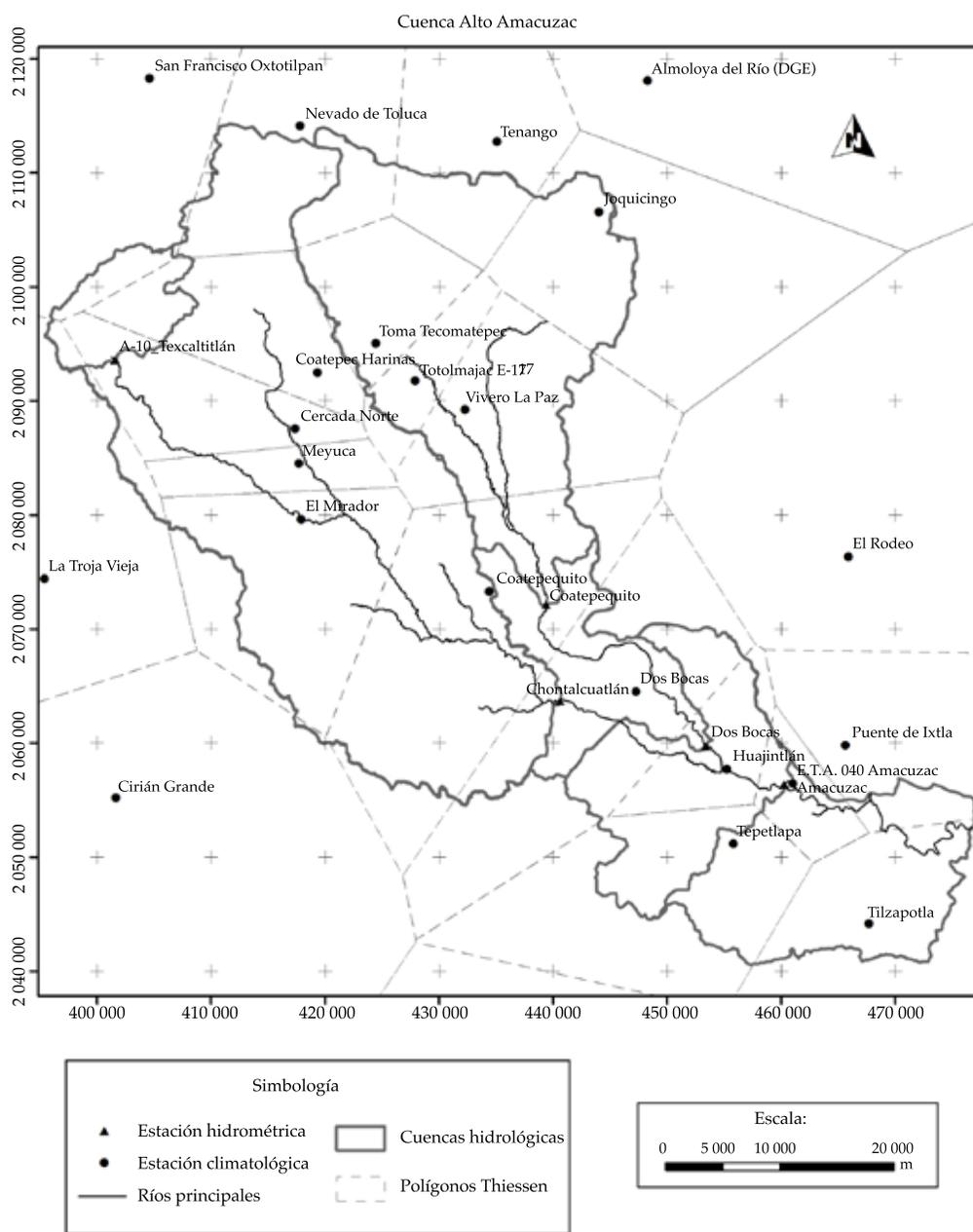


Figura 6. Ubicación de las estaciones climatológicas e hidrométricas. Fuente: elaboración propia con datos de INEGI y Conagua.

superficial; finalmente se determina la contribución del flujo base en el hidrograma resultante mediante el modelo de depósitos lineales (Bennett, 1998).

En el proceso de calibración es necesario definir valores adecuados para cada parámetro; entre mayor sea el número de parámetros

involucrados en cada etapa de cálculo, mayor es el grado de dificultad para obtenerlos. En este caso, para cada cuenca hidrológica se deben establecer 25 parámetros: 17 pertenecientes al modelo SMA, dos pertenecientes al modelo de Clark y seis pertenecientes al modelo de depósitos lineales.

Se puede recurrir a varias estrategias para calibrar un modelo con varios parámetros. Si los parámetros tienen sentido físico, se establecen relaciones entre sus valores y las características geomorfológicas de las cuencas, utilizando expresiones matemáticas, tablas y rangos de valores orientativos propuestos por diferentes autores; si los parámetros no tienen sentido físico, pero dominan en ellos algunas condiciones de tipo matemático, en algunos casos hay valores que se pueden estimar por criterios subjetivos, comparándolos con los adoptados en estudios similares (Grupo de Emisarios Submarinos e Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, 2004). En este estudio se obtuvieron los parámetros a partir de las características geomorfológicas, ya que varios parámetros dependen del tipo de vegetación; la pendiente del terreno; el uso y el tipo de suelo, como es el caso de la capacidad de almacenamiento del dosel forestal y la capacidad de almacenamiento superficial en depresiones. De igual manera se determinaron los parámetros relacionados con las características del suelo (textura, porosidad y permeabilidad), como la máxima capacidad de infiltración de agua en el suelo, la máxima capacidad de almacenamiento de agua en el suelo, la capacidad de almacenamiento en la zona de tensión del suelo y la máxima capacidad de percolación.

#### *Análisis de sensibilidad*

Para realizar el análisis de sensibilidad se propusieron valores de los parámetros tomando como base los reportados en los trabajos de Bennett (1998) y el Grupo de Emisarios Submarinos e Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (2004), y se realizó la simulación en la cuenca Texcaltitlán. Después se optó por multiplicar por factores de 10 y de 0.2, cambiando uno a la vez los valores de los parámetros necesarios para realizar la simulación en el modelo SMA, excepto cinco valores que representan el almacenamiento en la vegetación, en superficie, en el suelo y subsuelo al inicio de la simulación, pues estos valores no afectan los resultados obtenidos

cuando se hace la simulación continua de varios años (Bennett, 1998).

#### *Calibración del modelo*

Para realizar la calibración se optimizaron los parámetros, utilizando las funciones objetivo “suma de errores absolutos”, “suma de residuos cuadrados”, “error porcentual en pico”, “error cuadrático medio de la raíz del pico-ponderado” y “error porcentual en volumen” (USACE, 2017). Debido a que en este caso interesa conocer el caudal de escurrimiento diario en las subcuencas, se consideró como criterio de aceptación un error menor de 10% entre los volúmenes observado y simulado.

#### *Validación del modelo*

Para determinar la bondad de ajuste del modelo hidrológico se usa el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970). Según Moriasi *et al.* (2007), los valores del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe entre 0 y 1 son aceptables, y el óptimo es el valor 1, mientras que un valor menor que 0 indica que la media de los valores observados es un mejor predictor que el modelo.

### **Estimación del potencial disponible**

Para cada sitio se determinó la curva de duración de caudales utilizando los datos obtenidos de caudal medio con el modelo calibrado en HEC-HMS. De la curva de duración de caudales se obtuvo el caudal mínimo que se puede asegurar con alta probabilidad, normalmente entre 85 y 95%. En este trabajo se utiliza el  $Q_{90}$ , es decir, el caudal que se encuentra en el río el 90% del año (UTP, 2010; Ayros & Salazar, 2011). Posteriormente se calculó la potencia hidráulica bruta utilizando la ecuación:

$$P = 9.81QH \quad (1)$$

donde  $P$  es la potencia bruta en kW,  $Q$  es el caudal en  $m^3/s$  y  $H$  es la carga de presión debida

a la energía potencial en m, que en este caso es el desnivel topográfico (Ortiz, 2011).

### *Análisis de costos*

El costo del kilowatt instalado es variable aun en centrales diseñadas con la misma potencia, pues depende de las condiciones propias del sitio y de las características técnicas del proyecto. Con el fin de conocer el costo aproximado de la inversión que se realizaría al llevar los sitios disponibles a las siguientes etapas de planeación y construcción de las PCHs, se hizo la evaluación de los sitios disponibles utilizando información del costo por kilowatt instalado (en euros) reportado en Ortiz (2011), aunque en algunos países puede variar el costo debido a factores como el transporte y la importación de los equipos. El costo de instalación de la PCH depende naturalmente de la caída y la potencia, y las centrales con potencia menor de 250 kW son más costosas por unidad de potencia, como se puede observar en la figura 7.

Se estimó el costo de cada PCH y la energía generada anualmente, considerando la eficiencia del grupo turbina-generator de 80%, pues se consideran turbinas hidráulicas tipo Michell Banki (Ortiz, 2011) de admisión parcial, por ser de bajo costo y ser adecuadas para desniveles bajos, además de ser muy estables de 1/3 a 3/3 de carga.

Los egresos anuales por los costos de operación anual, reparación y mantenimiento anual de la planta e insumos para administración anual fueron considerados como el 3.5% del costo por kilowatt instalado de acuerdo con la distribución porcentual de los costos de construcción de una PCH (Ortiz, 2011). El ingreso anual es por concepto de la venta de energía a un costo promedio de \$1.45 por kWh, obtenido con los costos del consumo básico, intermedio y excedente de las tarifas domésticas 1, 1A, 1B, 1C, 1D, 1E y 1F en temporada de verano y fuera de verano, que varían en el rango de \$1.26 a \$1.52, según la Comisión Federal de Electricidad de México (CFE, 2017). Con esta información se

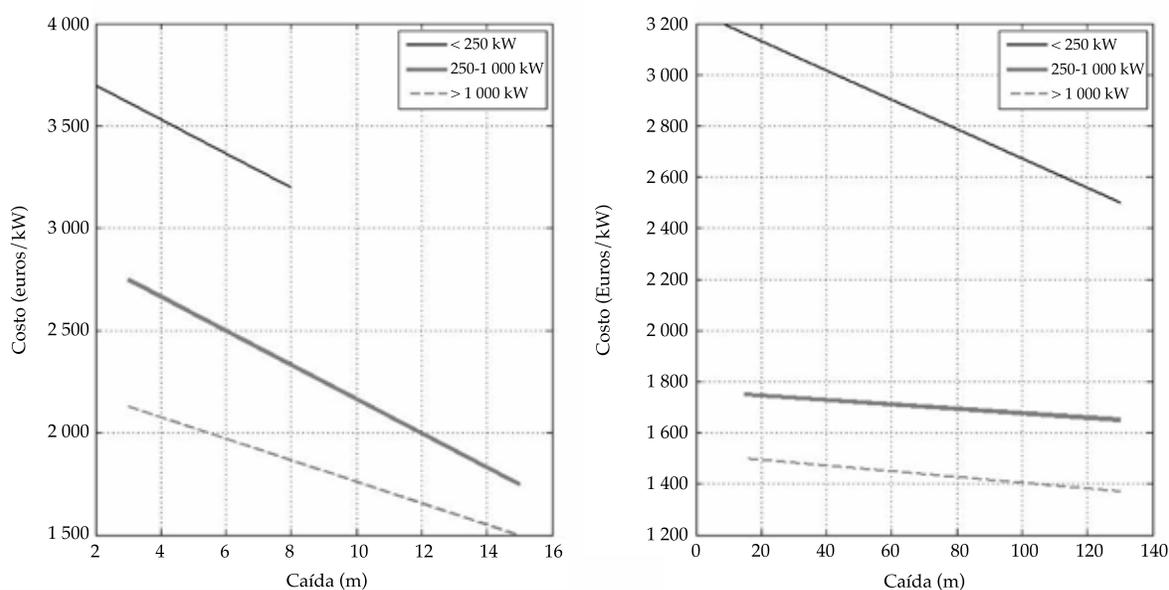


Figura 7. Costo por kilowatt instalado para PCHs (Ortiz, 2011).

obtuvo el ingreso neto anual como la diferencia entre los egresos e ingresos anuales, información necesaria para analizar la rentabilidad de cada proyecto.

#### *Factibilidad de una PCH al hilo de agua*

Al realizar el estudio de factibilidad es difícil decidir cuál debe ser el caudal de diseño para las pequeñas centrales hidroeléctricas. Por ello, como ejemplo, se utiliza la curva de duración de caudales para determinar la viabilidad del proyecto con base en cada uno de los caudales presentes en el cauce durante el año en el sitio 351, con código 7 749, ubicado en la cuenca Chontalcuatlán. La potencia de diseño es la potencia obtenida con la carga neta, es decir, la carga bruta o disponible menos las pérdidas en la tubería. La potencia mínima es la potencia a la cual funciona la turbina de manera aceptable; en este caso, dicha potencia se obtiene con el 16% del gasto de diseño, de acuerdo con la curva de rendimiento que se mantiene casi horizontal entre el 16 y 100% del caudal máximo de diseño (Osserberg, 2017).

Se propone considerar acero inoxidable con un coeficiente de rugosidad  $n = 0.014$  para determinar las pérdidas en la tubería, pues se buscó el diámetro de tubería con el que se perdiera menos de 10% de la carga disponible dada por el desnivel topográfico.

Se presentan dos criterios para determinar la rentabilidad de los proyectos: la tasa interna de retorno (TIR) y el valor presente neto (VPN). La primera es la tasa efectiva anual con la que el valor presente neto de los costos es igual al valor presente neto de los beneficios (Fernández, 2007). Para este caso se considera que la vida útil de cada proyecto es de 25 años, pues aunque la obra civil y la tubería forzada pueden tener una vida útil de unos 50 años, la vida útil de la turbina es por lo general de 35 años, y la del generador de 14 a 25 años, dependiendo de la potencia, por lo que el proyecto requeriría una nueva inversión en el generador o turbina si se sigue utilizando la pequeña central hasta los 50 años.

## Resultados y discusión

### *Calibración y validación del modelo hidrológico*

#### *Análisis de sensibilidad*

Del análisis de sensibilidad se definió que la capacidad de almacenamiento del suelo (*soil capacity*); la capacidad del almacenamiento en la zona de tensión del suelo (*tension zone capacity*); la capacidad de almacenamiento del depósito subterráneo #1 (*groundwater 1 storage coefficient*); la capacidad de almacenamiento del depósito subterráneo #2 (*groundwater 2 storage coefficient*); la máxima capacidad de percolación del depósito subterráneo #2 (*groundwater 2 percolation rate*), y los coeficientes de almacenamiento del depósito subterráneo # 1 y # 2 (*groundwater 1 storage coefficient* y *groundwater 2 storage coefficient*) son los parámetros que más influyen en la variabilidad del caudal obtenido en la simulación, por lo que se debe poner especial atención al proponer los valores iniciales de estos parámetros para calibrar del modelo.

#### *Calibración del modelo*

Al realizar la simulación con las diferentes funciones objetivo se observó mayor similitud entre los hidrogramas medido y simulado con la función “error porcentual en volumen”. También se advirtió que el modelo tiende a establecerse con el primer evento de lluvia y puede modelar con cierta precisión desde un año de datos continuos, por lo que se puede deducir que no hay gran diferencia si se utiliza un periodo menor de datos en la calibración o en la validación. Los parámetros optimizados obtenidos en el proceso de calibración se muestran en el cuadro 1.

#### *Validación del modelo*

Al determinar la eficiencia del modelo para simular el volumen acumulado bajo el hidrograma se encontraron muy buenos resultados, pues el coeficiente de Nash-Sutcliffe fue de 0.9 o

Cuadro 1. Parámetros optimizados para cada una de las cuencas hidrológicas.

Núm.	Parámetro	Unidades	Texcaltitlán	Coatepequito	Chontalcuatlán	Dos Bocas	Amacuzac
1	Canopy Capacity	mm	1.609	1.174	1.063	1.155	1.154
2	Canopy Initial Storage Percentage	%	0.100	0.228	0.147	0.136	0.175
3	Clark Storage Coefficient	h	846.090	780.060	780.100	780.020	780.070
4	Clark Time of Concentration	h	2.110	5.980	8.210	10.100	11.130
5	Groundwater 1 Capacity	mm	20.121	45.073	54.988	55.124	55.162
6	Groundwater 1 Initial Storage Percentage	%	0.102	0.254	0.205	0.418	0.188
7	Groundwater 1 Percolation Rate	mm/h	0.734	0.631	0.907	1.106	0.873
8	Groundwater 1 Storage Coefficient	h	3 300.100	6 000.100	7 000.100	7 000.000	7 000.100
9	Groundwater 2 Capacity	mm	16.651	38.063	50.138	50.000	50.167
10	Groundwater 2 Initial Storage Percentage	%	0.102	0.253	0.197	0.084	0.183
11	Groundwater 2 Percolation Rate	mm/h	2.118	1.566	0.918	0.894	0.721
12	Groundwater 2 Storage Coefficient	h	3 522.100	4 750.100	5 999.700	6 000.000	6 000.200
13	Linear Reservoir GW 1 Coefficient	h	3 300.100	6 000.100	7 000.000	6 999.900	7 000.000
14	Linear Reservoir GW 1 Steps		2	15	18	28	30
15	Linear Reservoir GW 2 Coefficient	h	3 522.100	4 750.100	6 000.100	6 000.000	6000.200
16	Linear Reservoir GW 2 Steps		2	15	18	28	30
17	Soil Capacity	mm	2.613	2.874	2.090	2.184	2.175
18	Soil Infiltration Rate	mm/h	2.266	1.463	0.769	1.186	0.839
19	Soil Initial Storage Percentage	%	0.089	0.248	0.151	0.173	0.190
20	Soil Percolation Rate	mm/h	0.531	0.445	1.111	0.755	0.689
21	Surface Capacity	mm	1.127	1.152	1.075	1.190	1.153
22	Surface Initial Storage Percentage	%	0.096	0.230	0.144	0.122	0.162
23	Tension Zone Capacity	mm	0.541	0.749	0.574	0.606	0.647

mayor en todas las cuencas hidrológicas, como se puede observar en el cuadro 2, mientras que para el caudal pico simulado, el modelo no es tan eficiente, pues el caudal pico simulado representa menos de 50% del caudal pico observado en las cinco cuencas. Sin embargo, el modelo es eficiente al representar los caudales medios diarios en un periodo de simulación de ocho años para la cuenca Texcaltitlán, 20 años para Coatepequito y 16 años para las cuencas Chontalcuatlán, Dos Bocas y Amacuzac, pues se observan valores entre “satisfactorio” y “adecuado” (Moriassi *et al.*, 2007).

Debido al carácter de este trabajo, es más importante representar adecuadamente los volúmenes escurridos y los caudales medios

diarios que los gastos pico. En la figura 8 se muestran los resultados de la validación de los parámetros para la cuenca Amacuzac.

### *Estimación del potencial disponible*

En las 578 curvas de duración de caudales, los valores de  $Q_{90}$  variaron entre 0.020 y 3.76 m<sup>3</sup>/s para obtener el potencial bruto disponible. En la figura 9 se muestran curvas tipo seleccionadas al azar de las cuencas Texcaltitlán, Coatepequito, Chontalcuatlán y Dos Bocas.

Se encontró que el potencial hidroenergético total de la cuenca Alto Amacuzac es de 49 227 kW distribuido en 578 sitios, de los cuales 575 tienen un potencial menor de 1 MW. En

Cuadro 2. Eficiencia del modelo para simular el volumen acumulado, caudal pico y el caudal medio diario.

Cuenca	Volumen acumulado		Caudal pico		Caudal medio diario	
	Nash-Sutcliffe	Ajuste	Caudal pico observado (m <sup>3</sup> /s)	Caudal pico simulado (m <sup>3</sup> /s)	Nash-Sutcliffe	Ajuste
Texcaltitlán	0.92	Muy bueno	26.3	7.5	0.610	Adecuado
Coatepequito	0.95	Muy bueno	101.4	42.1	0.614	Adecuado
Chontalcuatlán	0.89	Muy bueno	154.2	70.3	0.397	Satisfactorio
Dos Bocas	0.98	Muy bueno	236.2	101.9	0.562	Adecuado
Amacuzac	0.96	Muy bueno	506.6	147.3	0.518	Satisfactorio

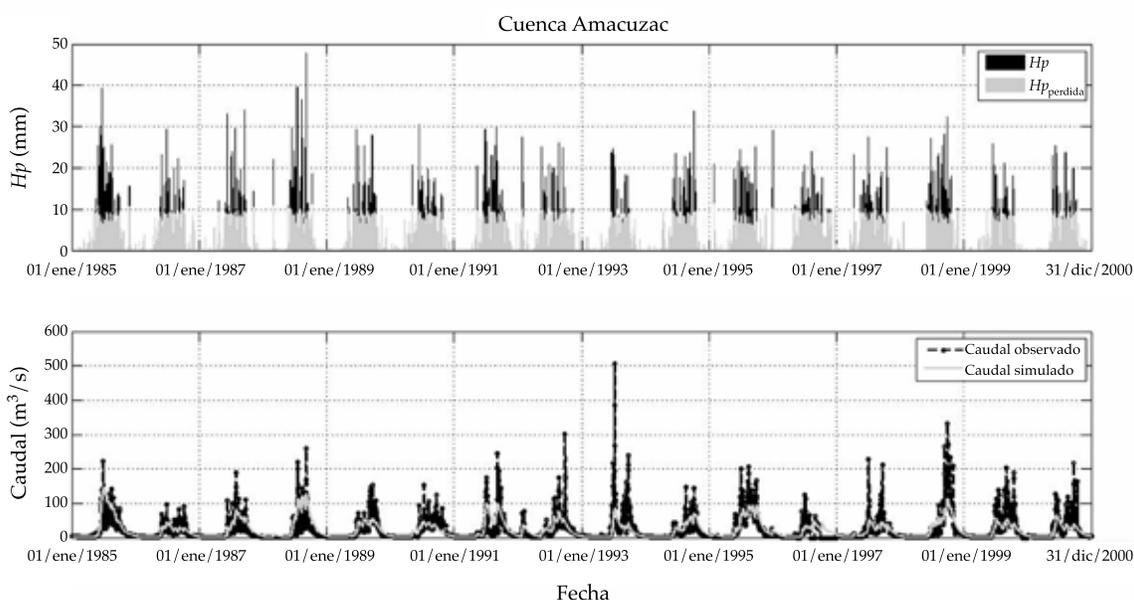


Figura 8. Hidrograma obtenido para la cuenca Amacuzac, periodo de validación.

el cuadro 3 se muestran las coordenadas de localización de algunos sitios disponibles; el desnivel o carga bruta, y la distancia horizontal en el tramo considerado; la pendiente media del tramo; el área de aportación al sitio elegido; el caudal presente en el cauce el 90% de año, y la potencia bruta disponible en los sitios elegidos. Dentro de los sitios localizados, el que tiene el potencial máximo es de 1 831.07 kW y el de menor potencial es de 1.43 kW.

En la figura 10 se presenta un mapa con la distribución de los sitios, resaltando el potencial disponible por zonas de acuerdo con

la ubicación de los ríos y arroyos respecto al área urbana: El Chiquihuitero hasta el río de las Flores, Chiltepec y Palo Seco al norte de Texcaltitlán; Los Capulines en las localidades de Las Vueltas y Pachuquilla; Yerbabuena y El Cristo al oeste del poblado La Unión Riva Palacios; arroyo Florido (segunda sección), Ayatuxco, Arroyo Santiago y río El Alacrán cerca de Zacualpan; Acevedocla y San José cerca de la localidad Poder de Dios y el municipio de Tetipac; arroyo Los Tizantes, arroyo San Gaspar y río San Mateo al Norte de Toltmajac; arroyo Los Cuervos, arroyo Tintojo

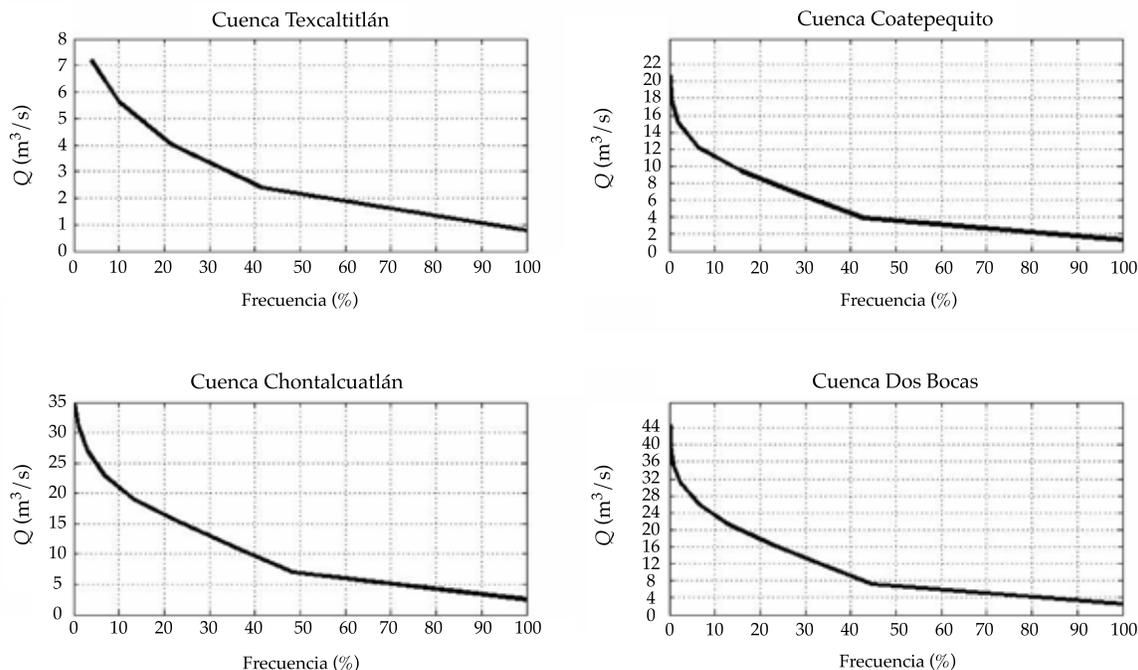


Figura 9. Curvas de duración de caudales tipo en las cuencas hidrológicas.

Cuadro 3. Características de algunos de los sitios localizados.

Sitio	Código	Desnivel (m)	Distancia (m)	Pendiente Media	Área de cuenca (km <sup>2</sup> )	Q (m <sup>3</sup> /s)	Potencia bruta (kW)	Coordenada UTM Y	Coordenada UTM X
11	398	13.40	235.25	0.057	673.669	2.920	383.716	2072913.4713	439454.0853
70	1554	68.68	957.68	0.072	160.969	0.900	606.385	2095089.0081	414668.9933
98	2132	53.54	906.60	0.059	145.287	1.000	525.272	2096156.0088	414810.9941
151	3397	15.96	423.66	0.038	8.745	0.071	11.119	2097854.0075	427506.9935
351	7749	8.97	298.70	0.030	829.408	3.750	329.934	2069017.0080	432938.9936
470	10489	133.32	4 373.31	0.030	177.529	1.400	1 831.073	2090010.0087	414803.9927

y arroyo Grande aguas abajo de San Pedro Tlanixco; Granadas, Zacapalco y Tlahuichia al sur de Teacalco; y San Jerónimo al sur de Zumpahuacán.

### Análisis de costos

En este estudio se encontraron 534 sitios con potencia bruta menor de 250 kW, 41 sitios con potencia entre 250 y 1 000 kW, y tres con

potencia mayor a 1 000 kW. El costo (pesos mexicanos) más elevado fue de \$43,781,104.00 para el sitio con una potencia bruta de 1 831.1 kW, con caída de 133.32 metros y caudal de 1.4 m<sup>3</sup>/s, y el mínimo de \$86,357.00, correspondiente a un sitio con caída bruta de 7.36 metros y potencia bruta de 1.52 kW. Se determinó que el costo total promedio de una PCH es de \$3,672,636.00 y el costo por kW instalado es \$52,865.00 en promedio.

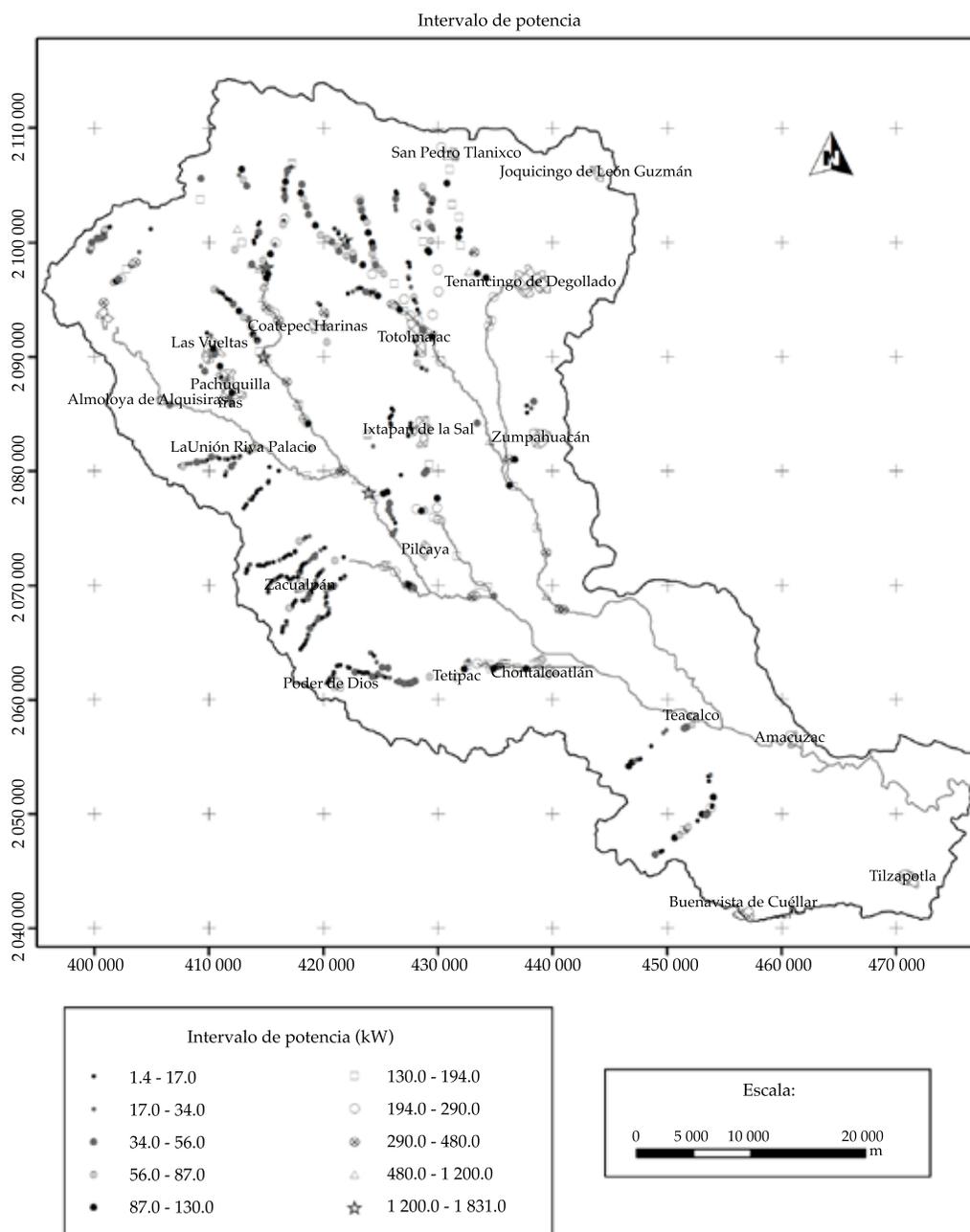


Figura 10. Distribución de los sitios con potencial micro y mini hidroeléctrico.

### Factibilidad de una PCH al hilo de agua

Como resultado del análisis de factibilidad se obtuvo que el diseño usando el  $Q_{90}$  es el más conveniente y se obtendría mayor beneficio por la inversión de acuerdo con la TIR, pero el valor presente neto indica que el proyecto que aporta

mayores ganancias es el obtenido al realizar el proyecto con un caudal de diseño igual a  $Q_{30}$  como se puede observar en la figura 11. Sin embargo, dado que se busca que la planta funcione la mayor parte del tiempo posible, se considera que el  $Q_{90}$  es apropiado para el diseño de plantas al hilo del agua.

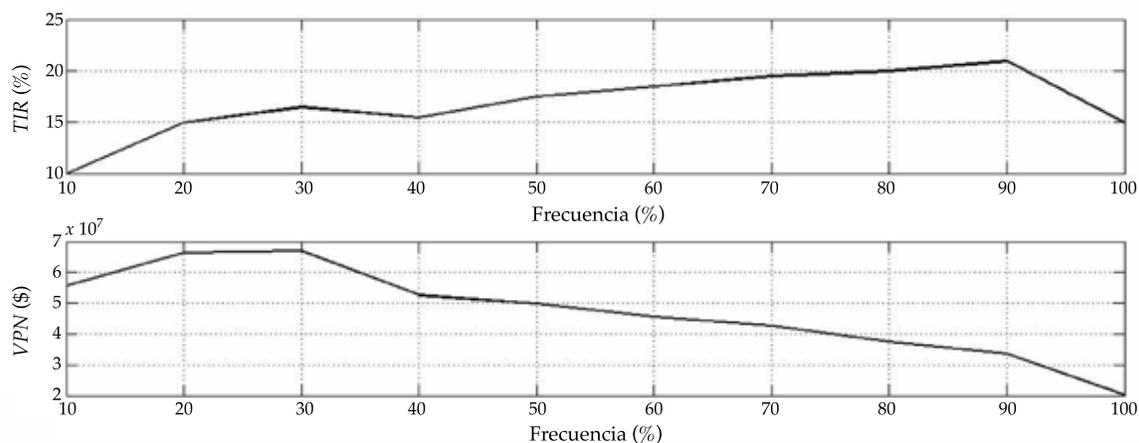


Figura 11. Rentabilidad del proyecto en el sitio 351 con código 7 749, cuenca Chontalcuatlán.

## Conclusiones

La planeación global en el sector energético facilita el desarrollo de generación de energía, considerando fuentes renovables, como las pequeñas centrales hidroeléctricas al hilo de agua. La metodología presentada en este estudio pretende dar bases para la futura evaluación energética.

En específico, el modelo hidrológico *Soil Moisture Accounting* es una herramienta recomendable para conocer el caudal medio en cuencas no aforadas, siempre y cuando se tenga información confiable para realizar la calibración y validación de los parámetros que se incluyen en el modelo.

El uso del modelo requiere de cierto cuidado, pues pequeñas variaciones en los parámetros más sensibles pueden dar resultados considerablemente diferentes.

En la cuenca del río Alto Amacuzac se encontraron 578 sitios con un potencial bruto disponible de 49 227 kW. Esta cantidad representa un 33.5% de la capacidad autorizada por la Comisión Reguladora de Energía para autoabastecimiento en 2011. Es importante resaltar que esta cantidad puede variar dependiendo de los criterios considerados para elegir un sitio apropiado para la generación de energía eléctrica.

El método propuesto se puede aplicar teniendo conocimientos básicos de sistemas de información geográfica. No es necesario aprender el manejo de un *software* complejo para poder localizar los sitios factibles para construir pequeñas centrales hidroeléctricas.

En la evaluación económica realizada para los sitios disponibles, el costo aproximado de inversión (en pesos mexicanos) en una PCH es de \$3,672,636.00 en promedio, y los costos estimados variaron de \$86,357.00 para el caso de la PCH con menor potencial a \$43,781,104.00 para la del potencial mayor encontrado.

Del estudio de factibilidad que se realizó para un caso específico se puede deducir que el  $Q_{90}$  es apropiado para el diseño de PCHs al hilo de agua de acuerdo con los resultados obtenidos de la tasa interna de retorno (TIR).

## Referencias

- Alemán, G. S., Casiano, V. H., Cárdenas, D. L., Díaz, R., Scarlet, N., Mahlkecht, J., Dallemand, J. F. & Parra, R. (2014). Renewable energy research progress in Mexico: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 140-153.
- Aparicio, F. J. (2010). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México, DF: Editorial Limusa.
- APER (2007). *Hydropower and environment: Technical and operational procedures to better integrate small hydropower*

- plants in the environment (22 pp.). Milano: Associazione Produttori Energia da Fonti Rinnovabili.
- Ayros, E. N., & Salazar, J. J. (2011). *Modelo probabilístico de la curva de duración de caudales para el diseño de una central hidroeléctrica*. III Congreso Nacional del Agua, Lima, Perú, 8-10 de marzo.
- Bennett, T. H. (1998). *Development and application of a continuous soil moisture accounting algorithm for the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)*. Thesis (M.S.) Davis: University of California.
- Bennett, T. H., & Peters, J. C. (2000). *Continuous soil moisture accounting in the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)*. *Building Partnerships*, 1, DOI: 10.1061/40517(2000)149.
- Bottcher, A. B., Whiteley, B. J., James, A. I., & Hiscock, J. G. (2012). Watershed assessment model (WAM): Model use, calibration, and validation. *Trans. ASABE*, 55(4), 1367-1383. Recovered from <http://dx.doi.org/10.13031/2013.42248>.
- Calderón, F. R. (2017). *Fuentes alternativas de energía eléctrica*. Consultado en enero de 2017. Recuperado de [http://www.actiweb.es/unid\\_develasco/archivo4.pdf](http://www.actiweb.es/unid_develasco/archivo4.pdf).
- Castro, A. (octubre, 2006). *Minicentrales hidroeléctricas. Manuales de energías renovables* (6a ed.). Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).
- CFE (2017). *Tarifas para el suministro y venta de energía eléctrica (2016-2017)*. Consultado en enero de 2017. Recuperado de [http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas\\_casa.asp](http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_casa.asp).
- Conagua (2011). Ubicación geográfica de México ante las sequías y su vulnerabilidad. En: *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diálogos por el agua y el cambio climático: la gestión de la vulnerabilidad ante las sequías* (pp. 14-17). México, DF: Comisión Nacional del Agua.
- Conagua (2017). *Red de estaciones climatológicas*. México, DF: Servicio Meteorológico Nacional. Consultado en enero de 2017. Recuperado de [smn1.conagua.gob.mx/climatologia/normales/estacion/EstacionesClimatologicas.kmz](http://smn1.conagua.gob.mx/climatologia/normales/estacion/EstacionesClimatologicas.kmz).
- ESRI (2017). *ArcGIS for Desktop: ArcMap*. Redlands, USA: Environmental Systems Research Institute, Inc. Consultado en enero de 2017. Recuperado de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/>.
- Fernández, E. S. (2007). *Los proyectos de inversión: evaluación financiera*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Fritz, J. J. (1984). *Small and mini hydropower systems. Resources assessment and project feasibility*. New York: McGraw Hill.
- Grupo de Emisarios Submarinos e Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (2004). *Plan de Investigación integral para la caracterización y diagnóstico ambiental de los sistemas acuáticos de Cantabria. Estudio de recursos hídricos. Anexo 2: Descripción y características del programa HEC-HMS*. Santander, España: Grupo de Emisarios Submarinos e Hidráulica Ambiental Universidad de Cantabria.
- Hall, D. G. (2011). *Hydropower resource assessment of Brazilian streams*. Río de Janeiro: HydroVision Brasil.
- IMTA (2012). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (Bandas). Actualización hasta 2006*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Comisión Nacional de Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- IMTA (2015). *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático* (148 pp.). Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- INEGI (2004). Capítulo 2: Interpretación de la carta (pp. 5-10). En: *Guía para la interpretación de cartografía-Edafología*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (2007). *Ficha técnica. Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, escala 1:250 000 Serie II (Continuo Nacional)* (3 pp.). Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (2010). *Ficha técnica. Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación serie IV escala 1:250 000* (1 p.). Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (2017). *Red hidrográfica escala 1:50 000 edición 2, Región hidrográfica Balsas, Cuenca río grande de Amacuzac*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Consultado en enero de 2017. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/Topografia/Descarga.aspx>.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. D., Harmel, R. L., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers. Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part 1-A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
- Ortiz, F. R. (2011). *Pequeñas centrales hidroeléctricas. Construcción paso a paso*. Bogotá: Ediciones de la U. Conocimiento a su Alcance. Recuperado de [www.edicionesdelau.com](http://www.edicionesdelau.com).
- Osserberg (2017). *La turbina Osserberg*. Consultado en enero de 2017. Recuperado de <http://www.ossberger.de/cms/es/hydro/la-turbina-ossberger/>.
- USACE (2017). *Software HEC-HMS*. Washington, DC: US Army Corps of Engineers. Consultado en enero de 2017. Recuperado de <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation.aspx>.
- UTP (2010). *Sistemas de generación de energía eléctrica: hidrología básica. Programa de ingeniería eléctrica* (pp. 1-12.). Pereira, Colombia: Universidad Autónoma de Pereira.

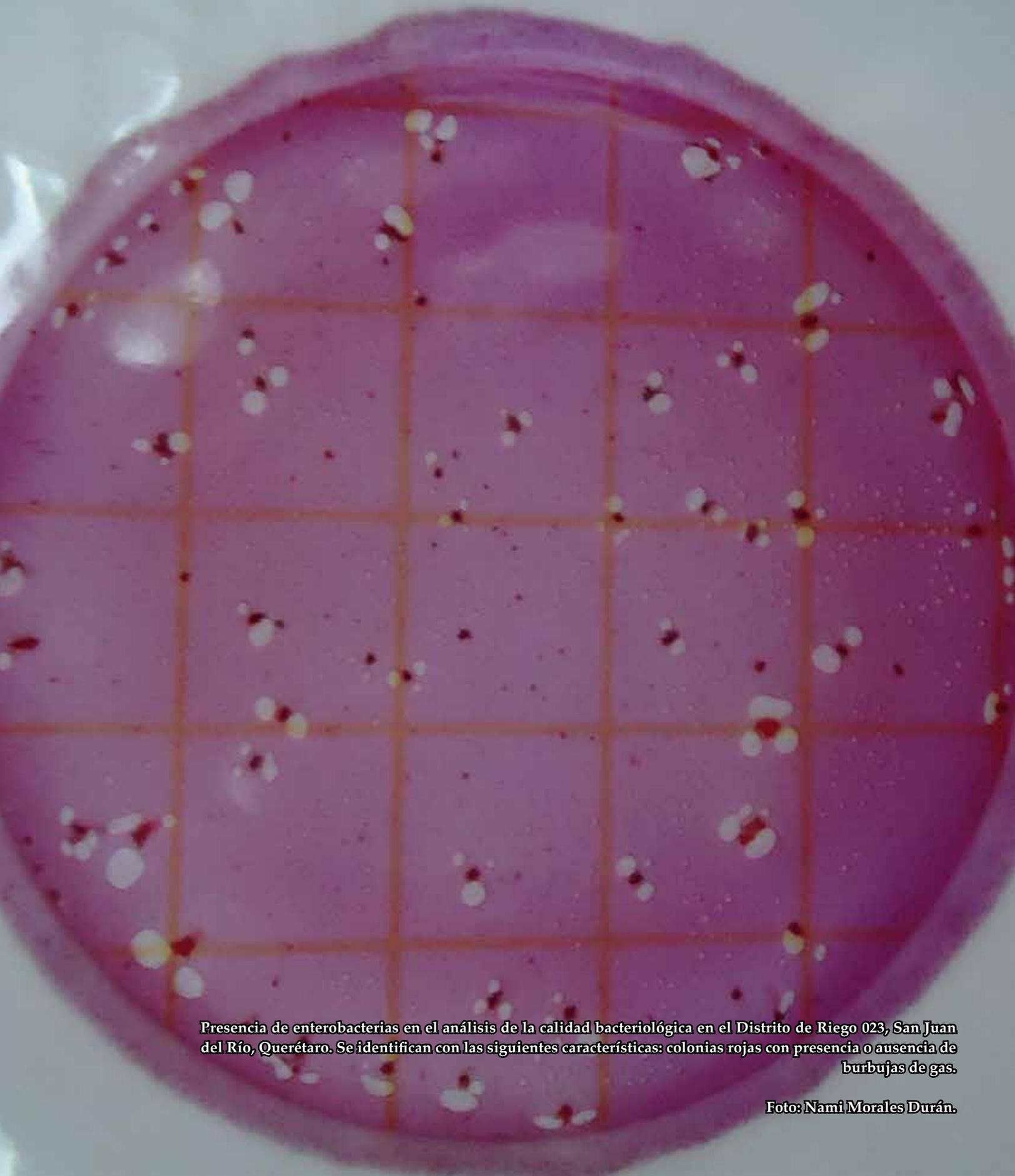
## Dirección institucional de los autores

*Mtra. Bertha Meza Prieto*

Universidad Nacional Autónoma de México  
Posgrado en Ingeniería  
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso  
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO  
bmezaprieto@yahoo.com

*Dr. Francisco Javier Aparicio Mijares*

Universidad Nacional Autónoma de México  
Posgrado en Ingeniería  
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso  
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO  
javieraparicio@prodigy.net.mx  
francisco.aparicio@conagua.gob.mx



Presencia de enterobacterias en el análisis de la calidad bacteriológica en el Distrito de Riego 023, San Juan del Río, Querétaro. Se identifican con las siguientes características: colonias rojas con presencia o ausencia de burbujas de gas.

Foto: Nami Morales Durán.

# Modelación bidimensional de la infiltración del agua en surcos aplicando el gradiente conjugado

• Carlos Chávez\* • Carlos Mota •  
*Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México*  
\*Autor para correspondencia

• Carlos Fuentes •  
*Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, México*

• Antonio Quevedo •  
*Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México*

DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-06

## Resumen

Chávez, C., Mota, C., Fuentes, C., & Quevedo, A. (enero-febrero, 2018). Modelación bidimensional de la infiltración del agua en surcos aplicando el gradiente conjugado. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(1), 89-100, DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-06.

El conocimiento de la distribución del bulbo de humedad durante un evento de riego ayuda a comprender de mejor manera la profundidad de mojado. El flujo del agua en suelo es modelado con la ecuación de Richards, sin embargo, la mayoría de las soluciones requiere de mucho tiempo computacional o la solución está acotada a un dominio en específico. En este trabajo se resuelve la ecuación de Richards 2D usando dos esquemas: un esquema implícito en todo el perfil y un esquema mixto: explícito en la zona no saturada e implícito en la saturada. El esquema implícito se resolvió con el gradiente conjugado para problemas no lineales usando en la superficie una función sinusoidal. La comparación se realizó entre los dos esquemas, y los resultados de perfiles de humedecimiento y lámina infiltrada fueron similares, dado un criterio de error. El proceso de infiltración se simuló en un evento de riego por surcos mediante tirante constante en los tres surcos, y en un segundo evento se les impuso un tirante diferente a cada uno. Los perfiles de distribución de humedad que se obtienen durante el tiempo simulado pueden ayudar a dar recomendaciones de las desventajas de establecer un tirante diferente en los surcos durante un evento de riego.

**Palabras clave:** Richards, bidimensional, diferencias finitas, riego por surcos.

## Abstract

Chávez, C., Mota, C., Fuentes, C., & Quevedo, A. (January-February, 2018). Modeling two-dimensional infiltration of furrow applying the conjugate gradient. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 9(1), 89-100, DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-06.

Knowledge of the bulb moisture distribution during an irrigation event helps to better understand the depth of wet soil. The flow of water in soil is modeled with Richards' equation, however, most solutions require a lot of computational time or the solution is bounded to a specific domain. In this study, the two-dimensional Richards' equation is solved using two schemes: one implicit in the entire depth and a mixed scheme: explicit in the unsaturated zone and implicit in the saturated zone. The implicit scheme was solved with the conjugate gradient for non-linear problems using a sinusoidal function on the surface. The comparison was performed between the two schemes and the results of wetting profiles and infiltrated depth were similar, given an error criterion. The infiltration process was simulated in a furrow irrigation event through a constant depth in the three furrows, and in a second event they were imposed a different depth to each one. The moisture distribution profiles obtained during the simulated time can help us to give recommendations for the disadvantages of establishing a different depth in the furrows during an irrigation event.

**Keywords:** Richards, two dimensional, finite differences, furrow irrigation.

---

Recibido: 23/01/2017

Aceptado: 12/07/2017

---

## Introducción

Las dos modalidades más comunes para el riego por gravedad son riego por melgas y riego por surcos. Estos procesos ocurren, como es natural, en el espacio 3D. Cuando la geometría del espacio y las condiciones de frontera son invariantes respecto a algún eje coordenado, el proceso de infiltración puede simplificarse y considerarse como un proceso unidimensional; este es el caso del riego por melgas, en el cual la geometría del espacio es parecida a un paralelepípedo. En el riego por surcos, la geometría del proceso es más compleja y requiere que se consideren al menos dos variables espaciales para su simulación correcta (López-Avendaño, Palacios-Vélez, Fuentes-Ruíz, Rendón-Pimentel, & García-Villanueva, 1997).

La ecuación que representa el movimiento del agua en un suelo parcialmente saturado es obtenida mediante la combinación del principio de continuidad y la ley de Darcy. Si se introduce la capacidad específica como la derivada de la curva de retención ( $C(\Psi) = \partial\theta / \partial\Psi$ ), la ecuación resultante queda expresada en términos de una variable  $\theta(\Psi)$ , denominada ecuación de Richards (1931), que en su forma bidimensional adquiere la forma:

$$C(\Psi) \frac{\partial\Psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(\Psi) \frac{\partial\Psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\Psi) \frac{\partial\Psi}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\Psi)}{\partial z} \quad (1)$$

donde  $\theta$  es el contenido de humedad;  $\Psi$ , la presión;  $x$ , una variable espacial (horizontal);  $z$ , la profundidad;  $K$ , la conductividad hidráulica y  $t$  es el tiempo.

Para resolver esta ecuación se incorporan las características hidrodinámicas del suelo: la curva de retención de humedad y la curva de conductividad hidráulica. Las funciones más utilizadas para representarlas son la ecuación de van Genuchten (1980), y la ecuación de Brooks y Corey (1964), respectivamente:

$$\frac{\theta(\Psi) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ 1 + \left( \frac{\Psi}{\Psi_d} \right)^n \right]^{-m} \quad (2)$$

$$K(\theta) = K_s \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\eta \quad (3)$$

donde  $\theta_s$  es el contenido de humedad a saturación, generalmente asimilada a la porosidad total del suelo ( $\phi$ );  $\theta_r$ , el contenido de humedad residual;  $\Psi$ , la presión;  $\Psi_d$ , un valor característico de la presión;  $K_s$ , la conductividad hidráulica saturada;  $\eta$ ,  $m$  y  $n$  son parámetros de forma adimensionales y positivos.

Los parámetros  $m$  y  $n$  son relacionados a partir de la restricción propuesta por van Genuchten (1980) al modelo de la conductividad hidráulica de Burdine (1953):  $m = 1 - 2/n$ . El parámetro  $\eta$  es relacionado con  $m$  y  $n$ , y la porosidad total mediante (Fuentes, Zavala, & Saucedo, 2009):

$$\eta = 2s \left( \frac{2}{mn} + 1 \right) \quad (4)$$

donde  $s = D_f/E$ , en la cual  $D_f$  es la dimensión fractal del medio poroso y  $E = 3$  es la dimensión de Euclides del espacio físico, ligado a la porosidad total con la ecuación implícita siguiente:

$$(1 - \phi)^s + \phi^{2s} = 1 \quad (5)$$

Existen algunos trabajos en la literatura que estudian la ecuación de Richards en dos dimensiones: Zavala-Trejo, Fuentes-Ruíz y Saucedo-Rojas (2005) estudiaron el drenaje agrícola subterráneo, para lo cual utilizaron la ecuación de Richards bidimensional (2D). Saucedo, Zavala, Fuentes y Castanedo (2013) acoplaron la ecuación de Barré de Saint Venant unidimensional con la ecuación de Richards 2D para modelar el riego por melgas. López-Avendaño *et al.* (1997) analizaron la infiltración de agua en un dominio tipo surco utilizando la ecuación de Richards 2D. Sin embargo, la solución que aplican para resolverlo es con la discretización de la derivada de manera convencional: agregando un factor de peso o parámetros de interpolación para el tiempo y el espacio. En este estudio se resuelve la ecuación de Richards 2D —aplicado al riego por surcos— usando dos esquemas: un esquema implícito para todo el perfil y un esquema mixto:

explícito en la zona no saturada e implícito en la saturada. El esquema implícito se resolvió con el gradiente conjugado para problemas no lineales usando en la superficie una función sinusoidal. El modelo propuesto está adaptado para simular la variación del tirante en el tiempo (condición de Dirichlet) y en la zona seca del surco se puede imponer una condición de tipo Neumann, por lo que pueden aplicarse condiciones de evaporación o una función de transpiración de acuerdo con las necesidades que se requieran.

## Materiales y métodos

### Creación del dominio espacial

El dominio espacial para resolver la ecuación de Richards se creó con las siguientes etapas: 1) selección y discretización de las fronteras del dominio; 2) relleno de las regiones interiores con puntos aleatorios distribuidos uniformemente, y 3) triangulación con el algoritmo de Delaunay (1934). Los dos tipos de fronteras existentes son exteriores (donde los puntos de interés están en el interior) e interiores (donde los puntos de interés están en el exterior).

Para modelar la infiltración en los surcos se supuso una frontera cuadrada y el lado superior se sustituyó por una función periódica; en este caso, se optó por una función sinusoidal,  $f(x) = 15 \sin(\pi x/45)$ , que da un surco de 30 cm

de altura y 90 cm de lomo a lomo (figura 1). Una vez que se obtuvo la frontera, el siguiente paso fue obtener la discretización de la misma.

Para rellenar el interior, primero se obtuvo el cuadrado más pequeño que contiene a todos los puntos frontera. Una vez obtenido este cuadrado  $C: [a, b] \times [c, d]$ , se buscó el punto  $P_k$  usando una distribución uniforme dentro del cuadrado  $C$ . Para saber si  $P_k$  estaba dentro de la frontera, se encontró la suma de los ángulos desde  $P_k$  de cada par de puntos contiguos de la frontera (figuras 2 y 3).

Para un punto en el interior de una frontera, la suma de los ángulos mencionados es de  $\pm 360$  grados y para un punto en el exterior de la frontera la suma es de cero grados. Al descartar los puntos exteriores queda un dominio (figura 3(a)). La gran cantidad de puntos en la figura 3(a) que se generaron en este primer paso es porque se requiere que las regiones interiores estén lo más densas posibles. Posteriormente, se procedió a eliminar puntos que estuvieran a una distancia que se consideró conveniente, por ejemplo, todos aquellos que estuvieron a una distancia menor de 5 mm uno del otro (figura 3(b)), para finalmente proceder a la unión de los puntos restantes, obteniéndose como resultado una triangulación del dominio, como el mostrado en la figura 3(c). El dominio con más puntos tendrá una mayor cantidad de nodos, lo que implica un costo computacional mayor para encontrar la solución.

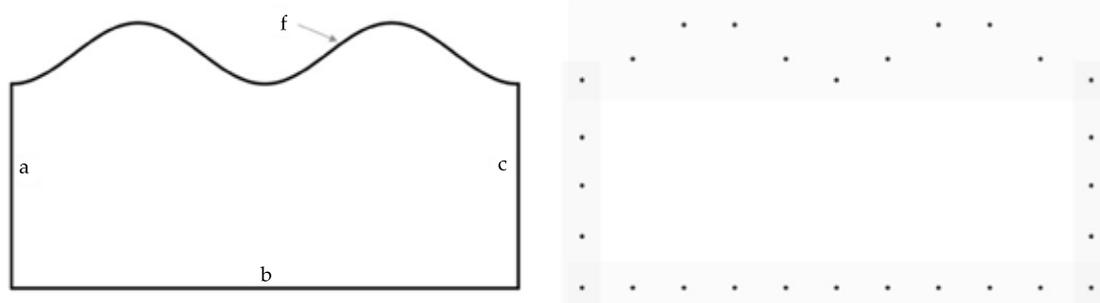


Figura 1. Izquierda: frontera con la parte superior parecida a un surco de riego. La parte superior  $f$  es una función sinusoidal trasladada y escalada para que concuerde con la parte superior de los lados  $a$  y  $c$ . Derecha: discretización de la frontera izquierda, puntos frontera.

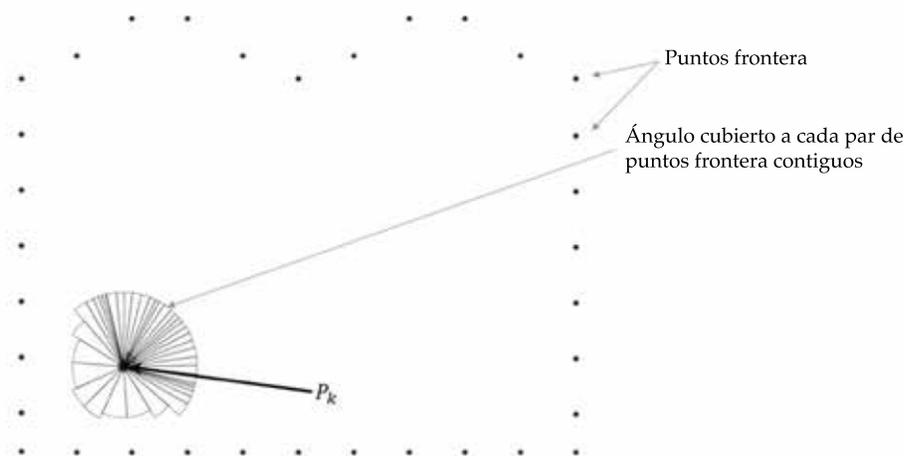


Figura 2. Punto  $P_k$  dentro de una frontera tipo “surco”. Obsérvese que para un punto que está en el interior de una frontera, el ángulo cubierto es de 360 grados.

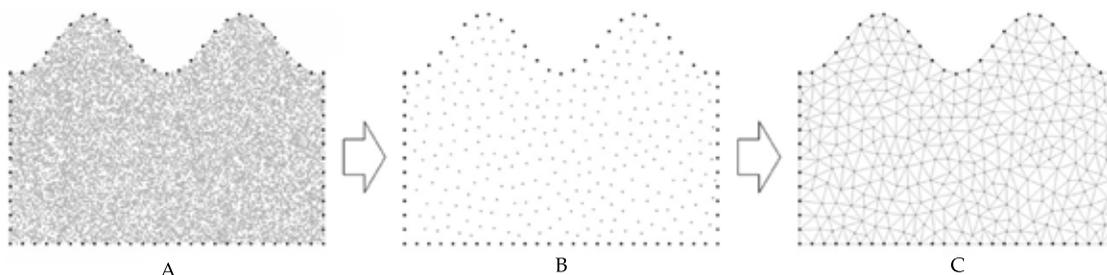


Figura 3 (a): dominio tipo “surco” con 10,000 puntos interiores; (b): dominio (1) después de eliminar los puntos que tienen una distancia menor a 5 mm; (c): triangulación del dominio (2).

No obstante que la función que se utilizó para representar un surco es periódica y que con una mitad sería suficiente para modelar la infiltración, en este trabajo se hace toda la ejemplificación usando tres surcos; esto debido a que se realiza una simulación con cargas diferentes en cada uno de los surcos con la finalidad de observar el comportamiento del perfil de humedecimiento.

### Solución en diferencias finitas para la ecuación de Richards 2D

La ecuación (1) evaluada en algún punto  $t$  en el tiempo se escribe de la siguiente forma:

$$C[\Psi(k)] \frac{\partial \Psi(k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K[\Psi(k)] \frac{\partial \Psi(k)}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K[\Psi(k)] \frac{\partial \Psi(k)}{\partial z} \right\} - \frac{\partial K[\Psi(k)]}{\partial z} \quad (6)$$

En esta ecuación,  $\Psi(k)$  es una función de tres variables  $\Psi(x, z, t)$ . La ecuación (1), con derivada temporal discreta adquiere las siguientes formas (además de otras, dependiendo del esquema y precisión elegidos):

$$C(\Psi_k) \frac{\Psi_k - \Psi_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(\Psi_k) \frac{\partial \Psi_k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\Psi_k) \frac{\partial \Psi_k}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\Psi_k)}{\partial z} \quad (7)$$

$$C(\Psi_k) \frac{\Psi_k - \Psi_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(\Psi_k) \frac{\partial \Psi_k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\Psi_k) \frac{\partial \Psi_k}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\Psi_k)}{\partial z} \quad (8)$$

La ecuación (7) corresponde al modelo explícito y la ecuación (8) corresponde al modelo implícito. Así, se define el lado derecho de la ecuación (8) como el operador  $Op(\Psi_k)$ ; las ecuaciones (7) y (8) toman una forma más simple:

$$C(\Psi_k) \frac{\Psi_{k+1} - \Psi_k}{t_{k+1} - t_k} = Op(\Psi_k) \quad (9)$$

$$C(\Psi_k) \frac{\Psi_k - \Psi_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} = Op(\Psi_k) \quad (10)$$

Cuando  $C[\Psi(k)] \neq 0$ , la solución que se obtiene es una solución recursiva:

$$\Psi_{k+1} = \frac{t_{k+1} - t_k}{C(\Psi_k)} Op(\Psi_k) + \Psi_k \quad (11)$$

Sin embargo, en la zona saturada  $C(\Psi_k) = 0$ , por lo que en esos puntos no puede aplicarse la ecuación (11). Para estos casos hay que optimizar la ecuación (10). El algoritmo que se utilizó en este trabajo es el del gradiente conjugado para problemas no lineales, también llamado "gradiente conjugado no lineal". El método requiere que se defina una función a minimizar, en nuestro caso requerimos que se cumpla la ecuación (10), por lo que naturalmente una función de error es la siguiente:

$$E(\Psi_k) = \left\| C(\Psi_k) \frac{\Psi_k - \Psi_{k-1}}{t_k - t_{k-1}} - Op(\Psi_k) \right\| \quad (12)$$

### El gradiente conjugado no lineal para Richards 2D

Siguiendo el procedimiento descrito por Dai y Yuan (1999), a partir de la ecuación (12), definida como la función de error, y con el operador definido a partir de la ecuación (8), el procedimiento consta de los siguientes pasos: 1) se

escogió  $x_0 = \Psi(k)$ ; 2)  $\Delta x_0 = -\nabla_x E(x_0)$ ; 3)  $\alpha_0 = \arg \min [E(x_0 + \alpha \cdot \Delta x_0)]$ ; 4)  $x_1 = x_0 + \alpha_0 \cdot \Delta x_0$  y 5)  $s_0 = \Delta x_0$ . Del paso 1 al paso 5 es la parte donde inicia  $x_{0'}$  los siguientes pasos (6 - 10) son iterativos y el algoritmo termina cuando  $E(x_0)$  es pequeño: 6)  $\Delta x_n = -\nabla_x E(x_n)$ ; 7)  $\beta = (\Delta x_n^T \cdot \Delta x_n) / (\Delta x_{n-1}^T \cdot \Delta x_n)$ ; 8)  $s_n = \Delta x_n + \beta \cdot s_{n-1}$ ; 9)  $\alpha_n = \arg \min [E(x_n + \alpha \cdot \Delta x_n)]$  y 10)  $x_{n+1} = x_n + \alpha_n \cdot s_n$ . Por último se escoge  $x_{n+1}$  como la solución a las presiones en el tiempo  $t$ . Aunque es posible aplicar el algoritmo para todo el vector de presiones, por razones de rendimiento los cambios se realizaron sólo en la zona saturada, debido a que en la zona no saturada es posible aplicar la regla de recurrencia. La condición inicial para  $x_0$  es  $\Psi(k)$  en la zona no saturada con el método explícito y  $\Psi(k-1)$  en la zona saturada.

### Método para resolver el operador $Op[\Psi(k)]$

Para simplificar la notación se hicieron las siguientes simplificaciones: se define  $\Psi_i$  como la presión en el nodo  $i$  en cualquier tiempo; la coordenada espacial del nodo  $i$  se define como  $C_i(x_i, z_i)$ , donde  $x_i$  es la coordenada en la longitud y  $z_i$  en la profundidad;  $C_{i,j}$  es la coordenada espacial del  $j$ -ésimo nodo relacionado con el nodo  $i$ , es decir  $C_{i,j} = C_{i,j}(x_{i,j}, z_{i,j})$ ;  $m_j$  es la cantidad de nodos relacionados con el nodo  $i$ , y  $P_i$  es la terna  $(x_i, z_i, \Psi_i) = (C_i, \Psi_i)$ . Utilizando derivación de orden uno, la derivada en  $C_i$  es estimada derivando el plano  $a \cdot x + b \cdot z + c$ , que mejor ajusta a los puntos  $\{P_{i'}, P_{1,i'}, P_{2,i'}, K, P_{m,i'}\}$ . Una forma de aproximar dicho plano es utilizar la matriz pseudoinversa definida por  $C_{j,i}$  y resolviendo para  $a, b$  y  $c$ ; los puntos  $\{P_{i'}, P_{1,i'}, P_{2,i'}, K, P_{m,i'}\}$  satisfacen  $a \cdot x + b \cdot z + c$ , por lo que  $a \cdot x_i + b \cdot z_i + c = \Psi_i$  y  $a \cdot x_{i,j} + b \cdot z_{i,j} + c = \Psi_{i,j}$ . Las ecuaciones anteriores definen el siguiente sistema de ecuaciones:

$$A \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_i & z_i & 1 \\ x_{i,1} & z_{i,1} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i,m_i} & z_{i,m_i} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Psi_i \\ \Psi_{i,1} \\ \vdots \\ \Psi_{i,m_i} \end{pmatrix} \quad (13)$$

La matriz  $A$  de la ecuación (13) no necesariamente es invertible; sin embargo, partiendo de la hipótesis de que todo sistema se puede optimizar (Penrose, 1955), queda definida como:

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = A^+ \cdot \begin{pmatrix} \Psi_i \\ \Psi_{i,1} \\ \vdots \\ \Psi_{i,m_i} \end{pmatrix} \quad (14)$$

donde  $A^+$  es la matriz pseudoinversa de  $A$ .

Con los valores  $a$ ,  $b$  y  $c$  obtenidos es posible derivar hacia cualquier dirección, en particular hacia  $x$  y  $z$ . De manera similar a la aproximación lineal, utilizando derivación de orden dos, la derivada en  $C_i$  se estimó derivando la superficie  $a \cdot x^2 + b \cdot x \cdot y + c \cdot y^2 + d \cdot x + e \cdot y + f$  que mejor ajustara a los puntos  $\{P_i, P_{1,i}, P_{2,i}, K, P_{m,i}\}$ . Una forma de aproximar dicha superficie es utilizar la matriz pseudoinversa definida por  $C_{ji}$  y resolviendo para  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$ , y  $f$ ; así se obtuvieron los puntos  $\{P_i, P_{1,i}, P_{2,i}, K, P_{m,i}\}$ , que satisfacen  $a \cdot x^2 + b \cdot x \cdot y + c \cdot y^2 + d \cdot x + e \cdot y + f$ , por lo que también satisfacen  $a \cdot x_i^2 + b \cdot x_i \cdot y_i + c \cdot y_i^2 + d \cdot x_i + e \cdot y_i + f = \Psi_i$  y  $a \cdot x_{i,j}^2 + b \cdot x_{i,j} \cdot y_{i,j} + c \cdot y_{i,j}^2 + d \cdot x_{i,j} + e \cdot y_{i,j} + f = \Psi_{i,j}$ . Estas ecuaciones quedan definidas de la siguiente manera:

$$A \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_i & z_i & 1 \\ x_{i,1} & z_{i,1} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i,m_i} & z_{i,m_i} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Psi_i \\ \Psi_{i,1} \\ \vdots \\ \Psi_{i,m_i} \end{pmatrix} \quad (15)$$

donde aplicando la misma consideración que en la solución de la ecuación (14), la matriz  $A$  queda definida como:

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{pmatrix} = A^+ \cdot \begin{pmatrix} \Psi_i \\ \Psi_{i,1} \\ \vdots \\ \Psi_{i,m_i} \end{pmatrix} \quad (16)$$

donde  $A^+$  es la matriz pseudoinversa de  $A$ .

Al final de este procedimiento, con los valores  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  y  $f$  obtenidos, se calculó la derivada.

### Cálculo de la lámina infiltrada

El volumen infiltrado por unidad de longitud de cauce en la unidad de tiempo ( $\dot{A}_l$ ) se calculó con la siguiente expresión (Fuentes, De León-Mojarro, & Hernández-Saucedo, 2012):

$$\dot{A}_l = \frac{\partial A_l}{\partial t} \quad A_l(x, t) = \int_{P_m} q_l(x, y, z, t) dP_m \quad (17)$$

donde  $q_l(x, y, z, t)$  es el caudal de infiltración por unidad de superficie de canal o caudal unitario y  $P_m$  es el perímetro mojado en cada surco.

### Aplicación

#### Comparación entre el esquema implícito y el esquema mixto

Los dos esquemas (implícito y mixto) se compararon. Los valores que se utilizaron fueron del suelo Montecillo (Fuentes, 1992; Saucedo, Zavala, & Fuentes, 2011; Saucedo et al., 2013), los cuales son  $\theta_r = 0.0000 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\theta_s = 0.4865 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ,  $K_s = 1.8400 \text{ cm h}^{-1}$ ,  $\Psi_d = -45.9000 \text{ cm}$ ,  $m = 0.1258$  y una profundidad  $L = 90 \text{ cm}$ . En esta simulación se utilizó una distancia promedio entre nodos en ambos esquemas de  $\Delta z = 1 \text{ cm}$ , y una discretización temporal de  $\Delta t = 0.01 \text{ h}$  para el método mixto, mientras que para el implícito se usó un  $\Delta t = 0.00128 \text{ h}$ . Los resultados para 240 min (figura 4) indican que no hay diferencias entre ambos esquemas, pero el esquema mixto requiere una discretización temporal mucho más fina que el esquema implícito. Sin embargo, el esquema implícito requiere más cálculos para cada tiempo, lo que hace la simulación de un evento de infiltración un poco más lenta.

El tiempo de cómputo requerido para simular los 240 min, usando una computadora de 6 GB en RAM, para el método mixto fue de 18 min, mientras que para el método implícito fue de 24 min aproximadamente, es decir, el método implícito requirió de un 30% de tiempo adicional que el método mixto, sin embargo, con

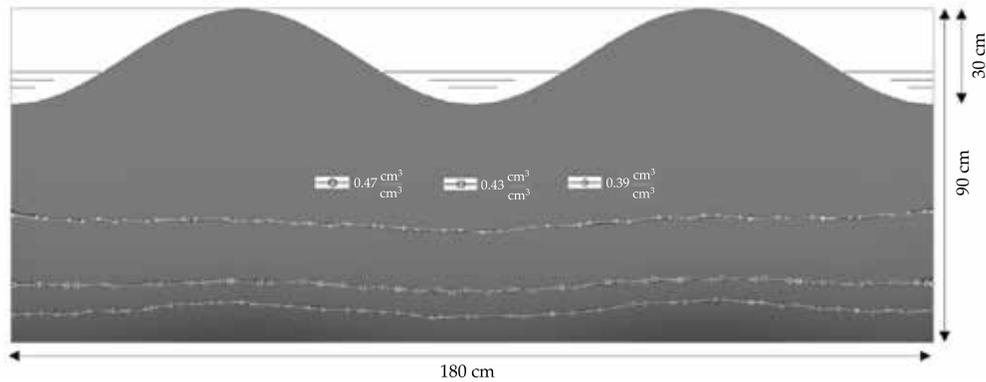


Figura 4. Comparación a los 240 minutos entre el esquema implícito (líneas blancas) y el esquema mixto (líneas negras).

los recursos computacionales de hoy en día, el tiempo de simulación puede acortarse un poco más.

Es importante mencionar que este tiempo de cómputo corresponde a la discretización de los tres surcos; si esta simulación se realizara únicamente en la mitad de un surco, los tiempos para obtener la solución se reducirían con la misma discretización espacial y temporal a 4.5 y 6 minutos, respectivamente. El resultado de las curvas de infiltración de las soluciones son prácticamente las mismas.

#### **Simulación de la infiltración en surcos en 2D: tirantes constantes en los surcos**

Tomando como base las características hidrodinámicas del suelo Montecillo se realizó una simulación del proceso de infiltración en tres surcos, en donde se aplicó un tirante de 10 cm en la primera y la tercera hora de infiltración, y en la segunda y cuarta hora se aplicaron 5 cm de tirante. Se trazaron curvas con los siguientes contenidos volumétricos de agua:  $0.47 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ,  $0.43 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ,  $0.39 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ,  $0.35 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ,  $0.31 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . En la figura 5 se muestran dos perfiles de humedad correspondientes a la primera hora de infiltración, en el minuto 60 el tirante cambia de 10 a 5 cm. Como puede verse, el frente de humedecimiento avanza más rápido en la primera hora (figura 5) que en la segunda (figura 6) debido a que en la segunda hora se tiene un

tirante de 5 cm desde la base del surco, por lo que en dicha hora los efectos de la capilaridad aportan más que los efectos de presión. El efecto inverso puede observarse en la imagen superior de la figura 7, en el cual la presión hacia abajo es mayor que en los minutos anteriores debido a que el tirante cambió a 10 cm en el minuto 120.

La figura 6 muestra dos perfiles de humedad correspondientes a la segunda hora de infiltración y la figura 7 muestra dos perfiles de humedad correspondientes a la tercera y cuarta hora. Como puede verse en la serie de imágenes, cuando se hace el cambio de tirante de 10 a 5 cm en el surco se favorece el humedecimiento en los lomos del surco, mientras que con un tirante mayor la redistribución del perfil de humedad es mayor en la base del surco que en el lomo. Con un tiempo de simulación de 60 minutos se puede apreciar que ya se ha logrado llevar el contenido de humedad a  $0.31 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  en una profundidad de 35 cm y los lomos del surco.

El contenido de humedad en el surco a los 180 minutos de simulación puede verse que está prácticamente saturado, es decir, tiene una cantidad de agua ligeramente mayor a  $0.47 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  y la máxima cantidad de agua que puede tener es de  $0.4865 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Después de los 135 min, la parte superior de los surcos está saturada, y a partir de ese momento, para cualquier contenido de humedad en el perfil del suelo tiende a ser horizontal, que se asemeja a una infiltración constante (figura 7).

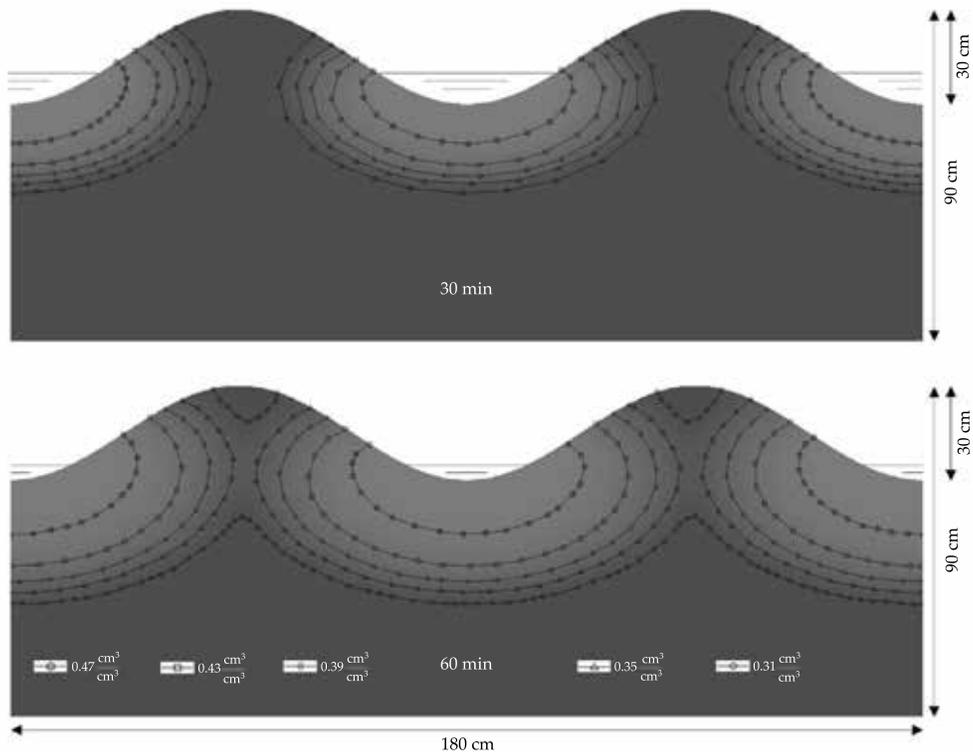


Figura 5. Primera hora de infiltración con un tirante de 10 cm desde la base del surco. A los 60 minutos el tirante cambia a 5 cm.

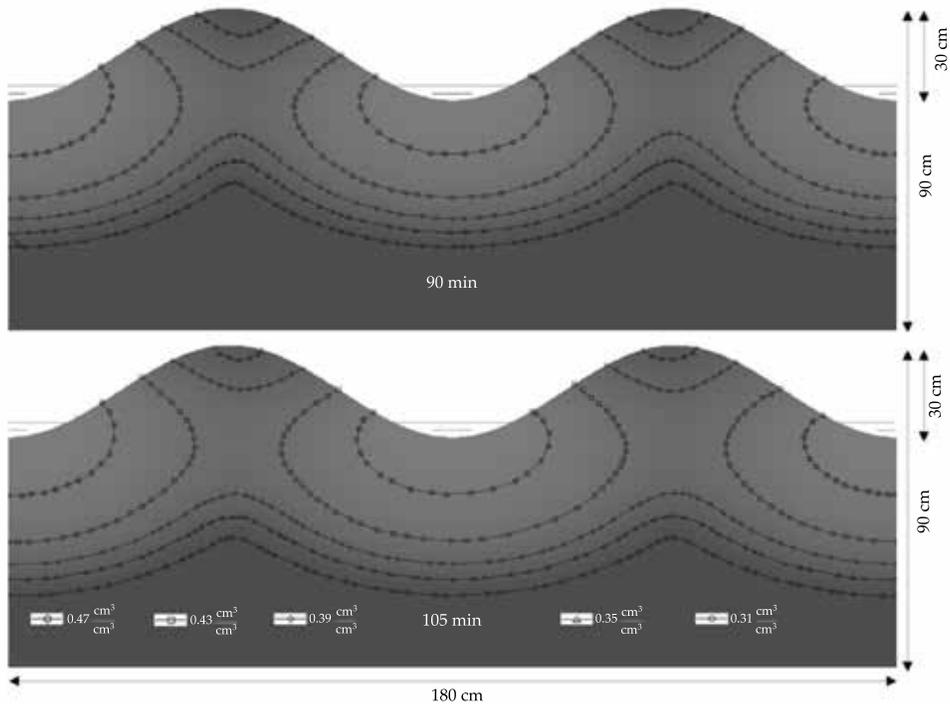


Figura 6. Distribución de la humedad durante la segunda y hora. El tirante de 5 cm es constante.



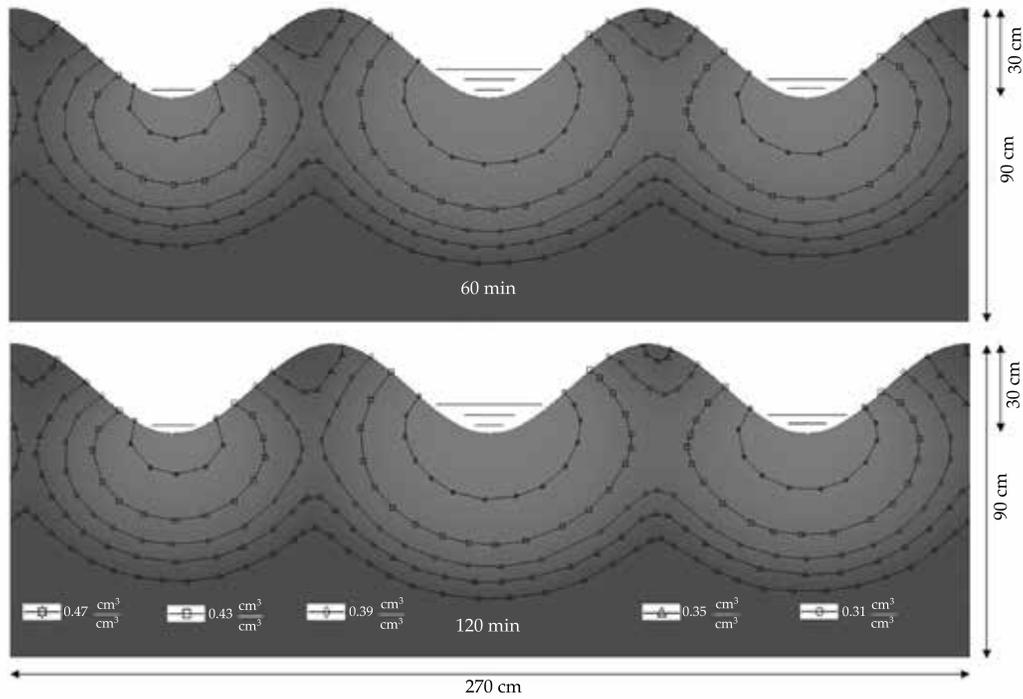


Figura 8. Distribución de la humedad en la primera y segunda hora.

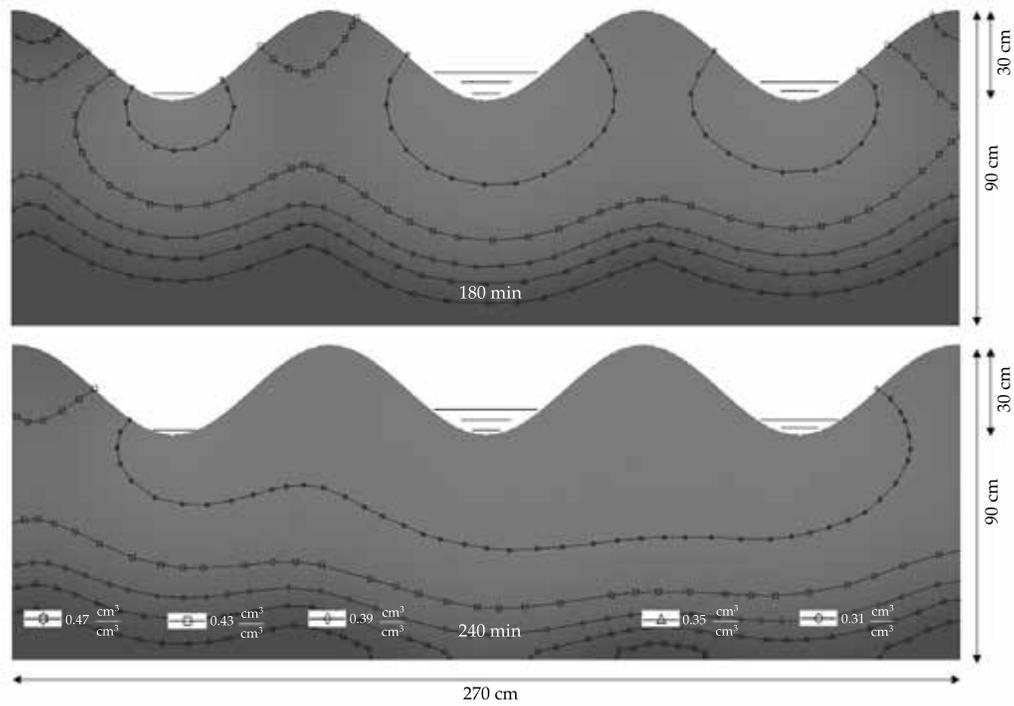


Figura 9. Distribución de la humedad en la tercera y cuarta hora.

como el área infiltrada, que si se multiplica por una longitud se obtiene el volumen infiltrado. Así, el área infiltrada ( $\text{cm}^2$ ) se calculó en cada surco con la ecuación (17) y al hacer las comparaciones (figura 10) se puede ver que para el tiempo de 240 min, los surcos de 9, 6 y 3 cm de tirante infiltran en promedio 512, 467 y 401  $\text{cm}^2$ , respectivamente. Es decir, se estarían infiltrando 110  $\text{cm}^2$  menos en el surco con carga de 3 cm; además de que en los surcos con mayor tirante tenderán, por diferencia en los tirantes, a contribuir al humedecimiento de los surcos con menor tirante, lo que también trae consigo una disminución en el patrón de mojado en cada uno de los surcos que les corresponde humedecer.

## Conclusiones

El fenómeno de infiltración en un dominio bidimensional se modeló y resolvió mediante el método del gradiente conjugado. La naturaleza de la ecuación de Richards hizo que no fuera suficiente el método explícito —a diferencia de otras ecuaciones no lineales—, por lo que se combinó

con el método implícito. La metodología presentada mostró buenos resultados, además de que muestra la bondad de incorporar un tirante variable en el tiempo.

La arbitrariedad en la posición de los puntos del dominio espacial nos permitió crear cualquier discretización espacial; sin embargo, esto ocasiona que las derivadas tengan que ser resueltas usando la superficie que más se acerque a una región de puntos. Con el uso de esta metodología, en la zona seca del surco se puede imponer una condición de tipo Neumann, por lo que pueden aplicarse condiciones de evaporación o una función de transpiración de acuerdo con las necesidades que se requieren.

Finalmente, la solución utilizada puede ayudar a tomar decisiones sobre el tiempo de riego y la profundidad a la cual se desea mojar, ya que en las simulaciones realizadas con tiempos máximos de 4 h se pudo ver que la profundidad saturada alcanzó los 50 cm, tiempo suficiente como para mojar la zona radicular de la mayoría de los cultivos. Sin embargo, en la práctica,

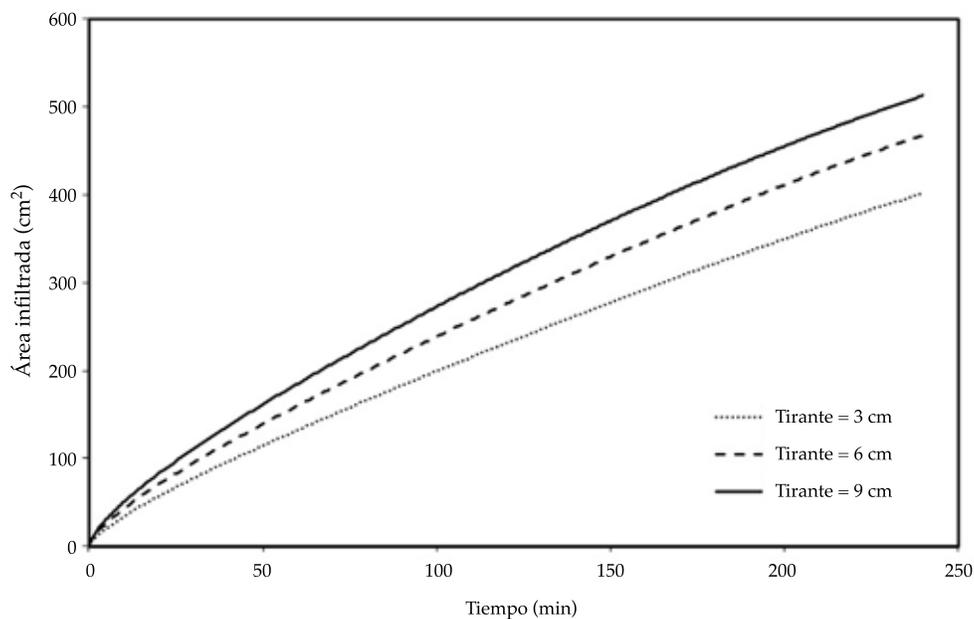


Figura 10. Evolución de la lámina infiltrada en surcos con carga variable.

estos tiempos son mucho mayores, lo que trae consigo la aplicación de láminas excesivas y bajas eficiencias de aplicación.

## Referencias

- Brooks, R. H., & Corey, A. T. (1964). Hydraulic properties of porous media and their relation to drainage design. *Transactions of the ASAE*, 7(1), 26-28.
- Burdine, N. (1953). Relative permeability calculations from pore size distribution data. *Journal of Petroleum Technology*, 5(3), 71-78.
- Dai, Y. H., & Yuan, Y. (1999). A nonlinear conjugate gradient method with a strong global convergence property. *SIAM Journal on Optimization*, 10, 177-182.
- Delaunay, B. (1934). Sur la sphere vide. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskii i Estestvennyka Nauk*, 7(793-800), 1-2.
- Fuentes, C. (1992). *Approche fractale des transferts hydriques dans les sols no-saturés* (276 pp.). Tesis de doctorado. Grenoble: Universidad Joseph Fourier de Grenoble.
- Fuentes, C., De León-Mojarro, B., & Hernández-Saucedo, F. R. (2012). Hidráulica del riego por gravedad. Capítulo 1 (pp. 1- 60). En: *Riego por gravedad*. Fuentes, C., & Rendón, L. (eds.). Querétaro, México: Editorial Universidad Autónoma de Querétaro.
- Fuentes, C., Zavala, M., & Saucedo, H. (2009). Relationship between the storage coefficient and the soil-water retention curve in subsurface agricultural drainage systems: Water Table Drawdown. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 135(3), 279-285.
- López-Avendaño, J. E., Palacios-Vélez, O. L., Fuentes-Ruíz, C., Rendón-Pimentel, L., & García-Villanueva, N. H. (1997). Bidimensional analysis on infiltration in furrow irrigation. *Agrociencia*, 31(3), 259-269.
- Penrose, R. (1955). A generalized inverse for matrices. In: *Mathematical proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 51(3), 406-413.
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Journal of Applied Physics*, 1(5), 318-333.
- Saucedo, H., Zavala, M., Fuentes, C., & Castanedo, V. (2013). Optimal flow model for plot irrigation. *Water Technology and Sciences*, 4(3), 127-139.
- Saucedo, H., Zavala, M., & Fuentes, C. (2011). Modelo hidrodinámico completo para riego por melgas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(2), 23-38.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.
- Zavala-Trejo, M., Fuentes-Ruíz, C., & Saucedo-Rojas, H. E. (2005). Radiación no lineal en la ecuación de Richards bidimensional aplicada al drenaje agrícola subterráneo. *Ingeniería hidráulica en México*, 20(4), 111-119.

## Dirección institucional de los autores

Dr. Carlos Chávez  
M.C. Carlos Mota  
M.C. Antonio Quevedo

Universidad Autónoma de Querétaro  
Centro de Investigaciones del Agua  
Facultad de Ingeniería  
Cerro de las Campanas s/n, Col. Las Campanas  
76000 Querétaro, Querétaro, MÉXICO  
Teléfono: +52 (442) 192 1200, ext. 6036  
chagcarlos@uaq.mx  
juan\_mota\_0@live.com.mx  
toniokv2@gmail.com

Dr. Carlos Fuentes

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
Coordinación de Riego y Drenaje.  
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso  
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO  
Teléfono: +52 (777) 3293 600, ext. 105  
cfuentes@tlaloc.imta.mx

# Modelling a hydrologic Black-Box

• Juan M. Stella\* •

*Tecnológico de Monterrey, Monterrey, México*

\*Correspondence author

• Glenn S. Warner •

*University of Connecticut, Storrs, USA*

DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-07

## Abstract

Stella, J. M., & Warner, G. S. (January-February, 2018). Modelling a hydrologic Black-Box. *Water Technology and Sciences* (in Spanish), 9(1), 101-112, DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-07.

Hydrologic simulation models have become an essential tool in the modern world of water management; they are used extensively and play an important auxiliary role in fulfilling the core tasks of water management, in policy preparation, operational water management and research. A physical based hydrologic Black-Box model was created to simulate the water inflows and outflows of the system that could be used for an educational purpose. Then a mathematical model using *Stella® software* was created to simulate the Black-Box model. The results of the simulations show that the combination of a physical hydrologic Black-Box model and the mathematical model using the *Stella® software* can help students understand the basic hydrologic processes.

**Keywords:** Model, Black-Box, *Stella® software*.

## Resumen

Stella, J. M., & Warner, G. S. (enero-febrero, 2018). Modelando una caja-negra aplicada a la hidrología. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(1), 101-112, DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-07.

Los modelos de simulación hidrológicos se han convertido en una herramienta esencial en el mundo moderno para la gestión de los recursos hídricos. Se utilizan ampliamente y juegan un papel importante en el cumplimiento de las tareas principales de la gestión del agua, la preparación de políticas, la gestión operativa y la investigación de los recursos hídricos. Un modelo hidrológico de base física de caja-negra fue creado para simular las entradas y salidas de agua de un sistema y puede servir para fines educativos. El modelo matemático utilizando el software *Stella®* se desarrolló para simular el modelo de la caja-negra. Los resultados de las simulaciones muestran que la combinación de un modelo hidrológico de base física de caja-negra, apoyado por un modelo matemático utilizando el software *Stella®*, podría ser de ayuda con los estudiantes, a fin de que entiendan de mejor manera los procesos hidrológicos básicos.

**Palabras clave:** modelo, caja negra, *Stella® software*.

---

Received: 03/02/2016

Accepted: 07/13/2017

---

## Introduction

Pollak (2012) considered that mathematicians usually divide the universe between mathematics, and the rest of the world, but the truth is that mathematics is needed to understand a situation in the real world, and then maybe to be used to take action or sometimes to forecast the future. It does not matter if the problem is important or

not, the real world and mathematics have to be taken seriously. The relationship between mathematics and the real world usually is the same. The situation in the real world is so diverse and complex that it is not possible to take everything into consideration, so it is necessary to simplify and decide which aspects are most important, that means we have an idealized version of a situation in the real world, a system, which then

can be translated into mathematical terms, this entire process is called mathematical modeling (Pollak, 2012).

Eykhoff (1974) considered that a mathematical model is the representation of the most important aspects of a system, with enough knowledge of that system in usable form. Therefore, modeling is an activity representing how systems, objects or even nature behave under some theoretical assumptions. These systems can be described by words, drawings, sketches, physical models, computer programs, or mathematical formulas, therefore, the modeling activity can be done in several languages, usually simultaneously, and here we are focused in the physical and mathematical language to build models (Quarteroni, 2009).

Figure 1 shows a simplified version of the modeling process from a problem to its solution applying the scientific method (Dym & Ivey, 1980).

In the other side, Pollak (2012) stated the difference between mathematical modeling and problem-solving. A problem solving may not refer to the outside world at all. Even when it does, problem-solving usually begins with the idealized situation in the real world in mathematical language, and finish with a mathematical solution or result. Mathematical modeling on the other hand, begins with a system and requires problem formulating before problem-solving, and once the problem is solved, moves back into the system where the results are considered in their original context (Pollak, 2012).

For Quarteroni (2009), mathematical modeling goal is to describe the different aspects of a system in the real world following the scientific method (figure 2), the interaction between observations, phenomena, predictions, and their dynamics through mathematics.

For Carson and Cobelli (2001) the necessary questions for a successful creation of a model are the following: Why? Identify the need for the model. Find? List the data we are seeking. Given? Identify the available relevant data. Assume? Identify the circumstances that apply. How? Identify the governing physical principles. Predict? Identify the equations that will be used, the calculations that will be made, and the answers that will result. Valid? Identify tests that can be made to validate the model and if the results are consistent with its principles and assumptions. Verified? Identify tests that can be made to verify the model.

Mathematical models (Quarteroni, 2009) also offer new possibilities to manage the increase complexity of technology, which is at the basis of modern industrial production due that models can save time and money in the development and validation phases, besides that models can explore new solutions in a very short period.

Models can be distinguished by the reason for their application, it can be dynamic if it has changed over time or stationary / static if it does not. Models can vary from policy analytical to scientific research models, operational models for real-time control of structures, calamity models and also overlap field of studies. But

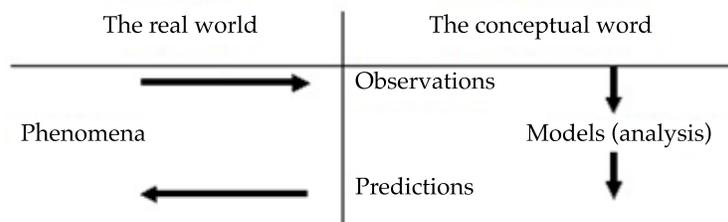


Figure 1. Simplified version of the modeling process from a problem to its solution applying the scientific method (Dym & Ivey, 1980).

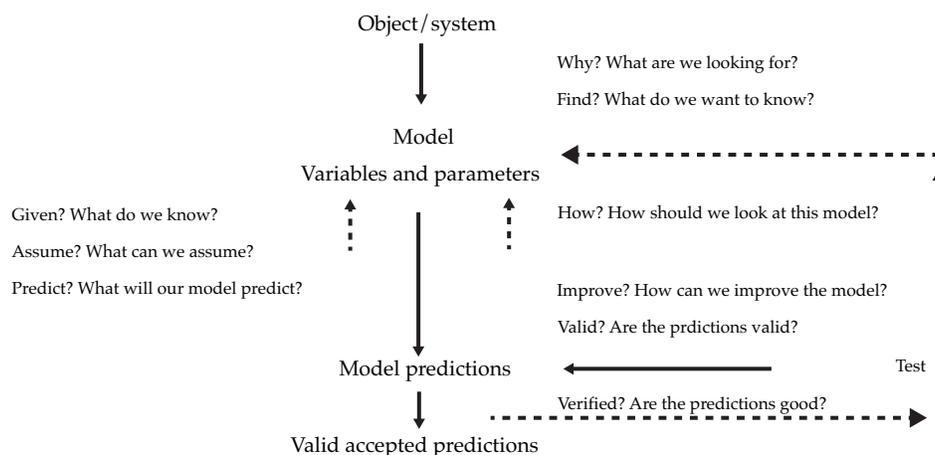


Figure 2. Interaction between observations, phenomena, predictions, and their dynamics through mathematics inspired by Carson and Cobelli (2001).

a mathematical model must be able to address universal scientific concepts, and it is necessary to define which level of detail must be introduced in the different parts of a model (Quarteroni, 2009).

Hydrology was defined by Penman (1961) as the science that attempts to answer the question: What happens to the rain? This could be a simple question, but experience has shown that quantitative descriptions of the land phase of the hydrologic cycle is very complicated and has a great deal of uncertainty. One-step forward to answer this question is the simplification of the hydrologic system, not just what happens with the rain in general, but what happens with the rain in a watershed. As Zin (2002) says, actual watershed theories cannot be generalized for all the processes and their interactions, due to the spatial and temporal heterogeneity of the watersheds.

Watershed hydrology is defined as the branch of hydrology that works with the hydrologic processes at the watershed scale to determine and understand the laws that rules the watershed (Singh & Woolhiser, 2002). A watershed may be as small as a backyard or large with hundreds of thousands of square kilometers, therefore hydrologic processes and

their spatial non uniformity are defined by climate, topography, geology, soils, vegetation, and land use and all of them are related to the size of the watershed (Singh & Woolhiser, 2002), but due to the complexity and large variability of the watersheds, they cannot be globally described and studied; modelling is necessary to analyze and predict their dynamics (Zin, 2002).

Watershed models are fundamental to water resources assessment, development, management, planning, design, and operation of projects, to conserve water and soil resources and to protect their quality and to understand dynamic interactions between climate and land-surface hydrology, for example, vegetation, snow cover, active permafrost layer, etc. are quite sensitive to the lower boundary of the atmospheric system (Singh & Woolhiser, 2002). Also, they are used to analyze the quantity and quality of stream-flow, reservoir system operations, groundwater development and environmental protection, surface water and groundwater management, water distribution systems (Wurbs, 1998) and to quantify the impacts of watershed management strategies, linking human activities within the watershed to water quantity and quality of the receiving stream or lake (Rudra, Dickinson, Abedini & Wall, 1999), for environmental and

water resource protection and the integration this watershed models with models of physical habitat, biological populations, and economic response (Singh & Woolhiser, 2002; Hickey & Diaz, 1999).

Mathematical models for watershed hydrology are designed to answer Penman's question at a level of detail depending on the problem and are employed in a wide field of areas, from watershed management and environmental protection to engineering design (Singh, 1995). At the field scale, models are used for varied purposes, such as planning and designing soil conservation practices, irrigation water management, wetland restoration, stream restoration, and water-table management. On a large scale, simulation models are used for flood protection projects, rehabilitation of aging dams, flood-plain management, water-quality evaluation, and water-supply forecasting (Singh & Woolhiser, 2002), even though there is not a simple or universal solution to all modelling and simulation problems as Van Waveren *et al.* (2000) has taken us to attention.

Klemeš's (1986) opinion is that, at the present stage of hydrologic sciences, hydrologic modeling is most credible when it does not pretend to be too sophisticated and all-inclusive, and remains confined to those simple situations whose physics is relatively well understood. For Kirchner (2006), advancing the science of hydrology will require new hydrologic measurements, new methods for analyzing hydrologic data, and new approaches to modeling hydrologic systems rather than models with a huge number of parameters, besides Kirchner (2006), is not the first to mention such approach, others like Klemeš (1986, 1988); Grayson *et al.* (1992); and Beven (2002), they did before.

Some promising research directions in the study of hydrology, in Kirchner's (2006) opinion, include (1) designing new data networks, field observations, and field experiments, recognizing the spatiotemporal heterogeneity of hydrologic processes, (2) developing gray box data analysis methods that are more compatible with the nonlinear and non-additive character

of hydrologic systems, (3) developing physically based ruling equations for hydrologic process at hill/slope scale and understanding that they could look different from the equations that describe the small-scale physics, (4) developing models that are minimally parameterized, and therefore stand some chance of failing the tests that they are subjected to, (5) developing ways to test models more comprehensively and incisively (Kirchner, 2006).

One type of mathematical models are the Black-Box models (Brooks, Folliott, Greggersen, & Thames, 1991). These models are based solely on empirical relationships between one or more inputs and outputs. The internal processes in the system being modeled are unknown and not represented in the form of a conservation of mass, momentum or energy approach. Typically, the input-output relationships are based on statistics such as a regression equation. Frequently, the regression constants are given as coefficients with little or no information regarding the variability. Examples in the field of hydrology include the Rational Equation and the Unit Hydrograph (Brooks *et al.*, 1991). Another type of mathematical models commonly used in science and engineering is the physical or process-based model. In this type of models, the underlying relationships among inflows, storages and outflows are represented through physics and basic principles of conservation of mass, momentum and/or energy and can be classified as follows (Sjöberg *et al.*, 1995):

1. White-Box models. This is the case when a model is perfectly known; it has been possible to construct it entirely from prior knowledge and physical insight.
2. Grey-Box models. This is the case when some physical insight is available, but several parameters remain to be determined from observed data. Considering two subcases is useful.
3. Physical modeling. A model structure can be built on physical grounds, which has a certain number of parameters to be estimated from data. This could, for example, be a state-space model of given order and structure.

4. Semi-physical modeling. Physical insights used to suggest certain nonlinear combinations of measured data signal. These new signals are then subjected to model structures of Black-Box character.
5. Black-Box models. No physical insight is available or used, but the chosen model structure belongs to families that are known.

For Black-Box models (Sjöberg *et al.*, 1995) the area is quite diverse, and covers topics from mathematical approximation theory, via estimation theory and non-parametric regression, to algorithms and currently much-discussed concepts like neural networks, wavelets and fuzzy models. There are important links to classical statistical approaches in non-parametric regression and density estimation, with kernel methods and nearest-neighbor techniques such as Kung (1993), and Haykin (1994), fuzzy models, like Brown and Harris (1994) and Wang (1994), non-parametric regression and density estimation, like Stone (1982), Silverman (1986) and Devroye and Györfi (1985), and wavelets and multiresolution techniques, like Meyer (1990), Daubechies (1992) Chui (1992) and Ruskai *et al.* (1992).

The key problem in system identification for Black-Box modeling is to find a suitable model structure within which a good model is to be found. Fitting a model by parameter estimation is in most cases not difficult. A basic rule in estimation is not to estimate what you already know. In other words, one should utilize prior knowledge and physical insight about the system when selecting the model structure.

For Sjöberg *et al.* (1995) the problem we are addressing in this research related to the application of a Black-Box model in hydrology is how to infer relationships between past input-output data and present-future outputs of a system when very little a priori knowledge is available, this is known as Black-Box modeling. There is a rich and well-established theory for Black-Box modeling of linear systems (*e.g.*, Ljung, 1987; Soderstrom & Stoica, 1989). It was not until the last few years that modeling and identification of nonlinear systems attracted wide interest

in the control community. So far, almost all attention has been concentrated on one single structure-neural networks. However, nonlinear modeling has been studied for a long time in the statistics community, where it is known under the label non-parametric regression (Sjöberg *et al.*, 1995).

The task of Black-Box linear models has, is to describe the systems frequency response or impulse response, just a mapping the number of inputs and outputs, but the nonlinear Black-Box situation is much more difficult. The main reason is that nothing is excluded, and a very rich spectrum of possible model descriptions must be handled. In this document, we shall discuss the possibilities and limitations with such nonlinear Black-Box identification (Sjöberg *et al.*, 1995).

This paper describes the concepts and limitations of a Black-Box model as compared to a process-based model. The exercise starts with a physical Black-Box, known amounts of water are added to the vertical cylinder in the top of the box, while outflows are measured from the spout on one end, the two parameters inflow and outflow are then related statistically. Once the results of the Black-Box approach are completed, the top is removed from the box to reveal the internal structure and physical processes involved in the system. A process-based model is then constructed that includes the physics of flow based on the size and shape of the different storages and flow conveyances using *Stella*® (Systems Thinking, Experiential Learning Laboratory, with Animation) software to replicate the Black-Box model and develop a dynamic model to predict outflows for given inflows. This will help students to understand some of the limitations and uses of the mathematical and Black-Box models and understand some basic laws that rule the hydrologic.

## Methods

### *Black-Box model*

By definition a Black-Box model is a fitted mathematical representation of a system without

regard to processes, the characteristics of such device usually are developed from observation of inputs/outputs, they don't identify or simulate processes involved, usually they are statistically based, e.g. regression, and in hydrology, rainfall is input and runoff or discharge is output and as examples we can include the Rational equation and the Unit Hydrograph.

The Black-Box used for this experiment (figure 3), has a vertical input cylinder above the Black-Box that represents a vertical section of soil on which precipitation might fall as show figure 3a. Figure 3b shows a horizontal spigot with invert height of 7.5 cm permits runoff to occur to a second storage once the cylinder is filled to that height. This second storage represents a temporary pond or lake or wetland with a controlled outflow from the system via a V notch weir. Water can also exit the second storage as vertical flow through a small metal pipe to a third, enclosed storage that represents a groundwater aquifer. In this model, there is no groundwater discharge, however, one could easily be added. There is a slow discharge directly from the simulated soil cylinder to the groundwater storage through a small tube with an adjustable clamp to control the seepage rate from the soil, all this system is represented by the picture in figure 3b. The soil porosity and/or infiltration capacity can be changed by adding materials such as marbles with high or infiltration capacity or small glass beads with low or infiltration capacity. Figure 3c shows the application of a Black-Box simulation, throwing water over the vertical cylinder as representation of precipitation.

### Stella® Software *model*

*Stella® software* from ISEE Systems Inc. (2003) is an icon-based dynamic simulation software which permits the user to build dynamic models by connecting components in a diagram based on their concepts and ideas of how a system works. Equations that describe the conservation of mass, energy or momentum are automatically developed within *Stella®* as the icons for fluxes and storages are connected on the desktop. A

user with limited programming skills can therefore easily build and run a model, and explore the influence of varied inputs and parameter values on the outputs. The icon-based software has boxes called stocks and are the storages of either mass or energy for a given reach of a stream, large arrows with valves represent fluxes of mass or energy into or out of the stock and the small thin arrows are connectors that indicate the dependence of one component another (Ford, 1999). The *Stella® software* automatically maintains conservation of mass based on the created diagram or flowchart, the mathematics of balance and conservation laws are straightforward at this level of abstraction and the solution to the underlying differential equations are solved by finite difference techniques behind the scenes with outputs in form of tables and graphs (Ford, 1999).

Figure 4 illustrates the *Stella®* diagram for the physical hydrologic Black-Box. The rectangles are stocks which represent the three different storages at a given instant of time. The pipe and valve icons are used to represent fluxes into or out of the storages; their units are volume per time. The circles are converters, which give parameter values or relationships between other components of the system in the form of equations or graphs. The arrows are connectors that the program uses to link the components. Built-in functions are readily available and conditional statements are easily incorporated.

The ruling equations to represent the Black-Box model using *Stella® software* are the standard hydraulic equations (Chow, 1964) for the size and shape of the different pipes, storages and flow conveyances.

Velocity:

$$v = \frac{q}{A} \quad (1)$$

Where:

$v$  = Average velocity [cm/s]

$q$  = Flow rate [cm<sup>3</sup>/s]

$A$  = Surface area [cm<sup>2</sup>]

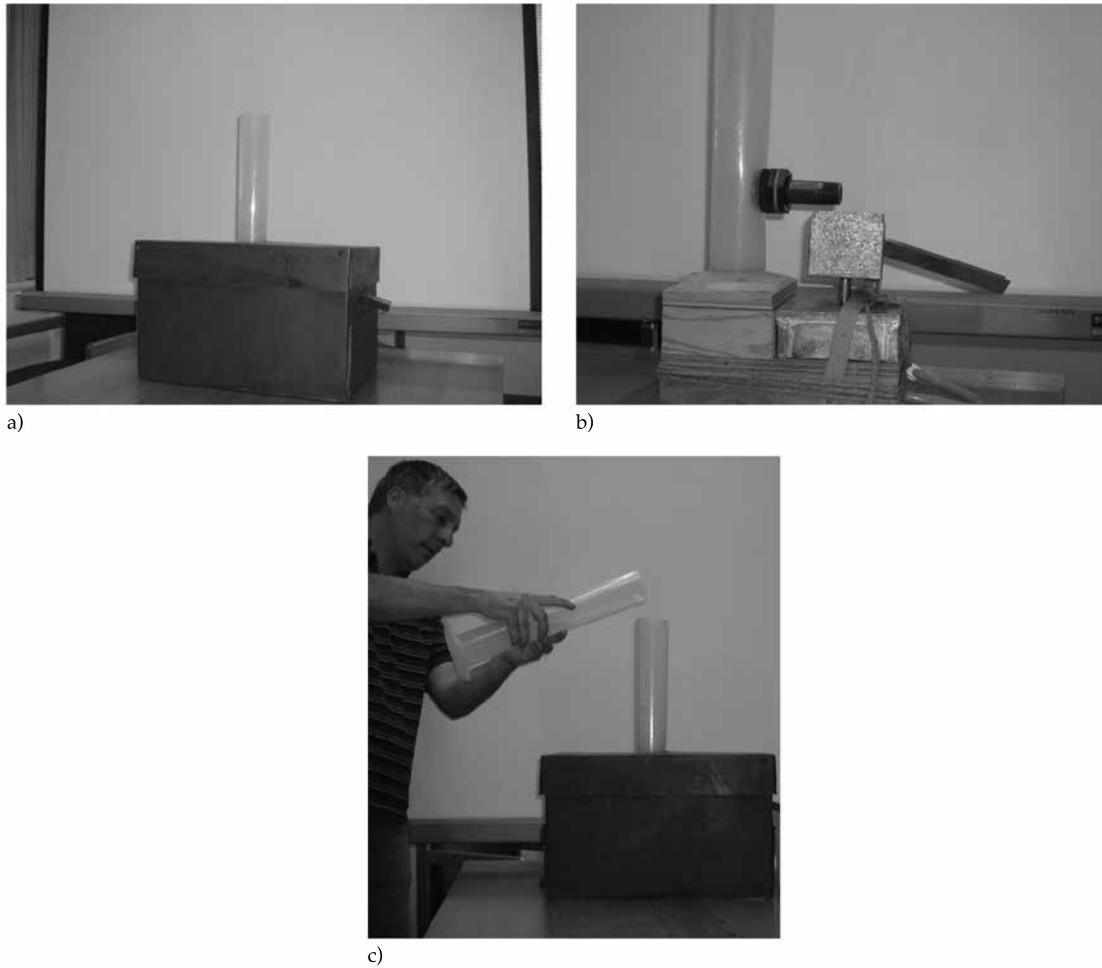


Figure 3. Photos of Physical Hydrologic Black-Box Model, a) External view of Black-Box, b) Internal components of the physical model with three reservoirs or storages, flow connectors from Soil to wetland and groundwater aquifer and c) Application of a Black-Box simulation throwing water over the vertical cylinder.

Reynolds number:

$$Re = \frac{4 * V_k * R}{v} \quad (2)$$

Where:

- $Re$  = Reynolds number [-]
- $v$  = Average velocity [cm/s]
- $V_k$  = Kinematic velocity [cm<sup>2</sup>/s]
- $R$  = Hydraulic radius [cm]

Energy Equation:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2 * g} + Hg = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2 * g} + Hl \quad (3)$$

Where:

- $P$  = Pressure [Kg/cm<sup>2</sup>]
- $\gamma$  = Specific weight [Kg/cm<sup>3</sup>]
- $z$  = Elevation [cm]
- $v$  = Fluid Velocity [cm/s]
- $g$  = Gravitational acceleration [cm/s<sup>2</sup>]
- $Hg$  = Head gain [cm]
- $Hl$  = Combined head loss [cm]

V notch weir:

$$q = \left(\frac{8}{15}\right) * \sqrt{2 * g * \tan\theta} \left(\frac{H}{2}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

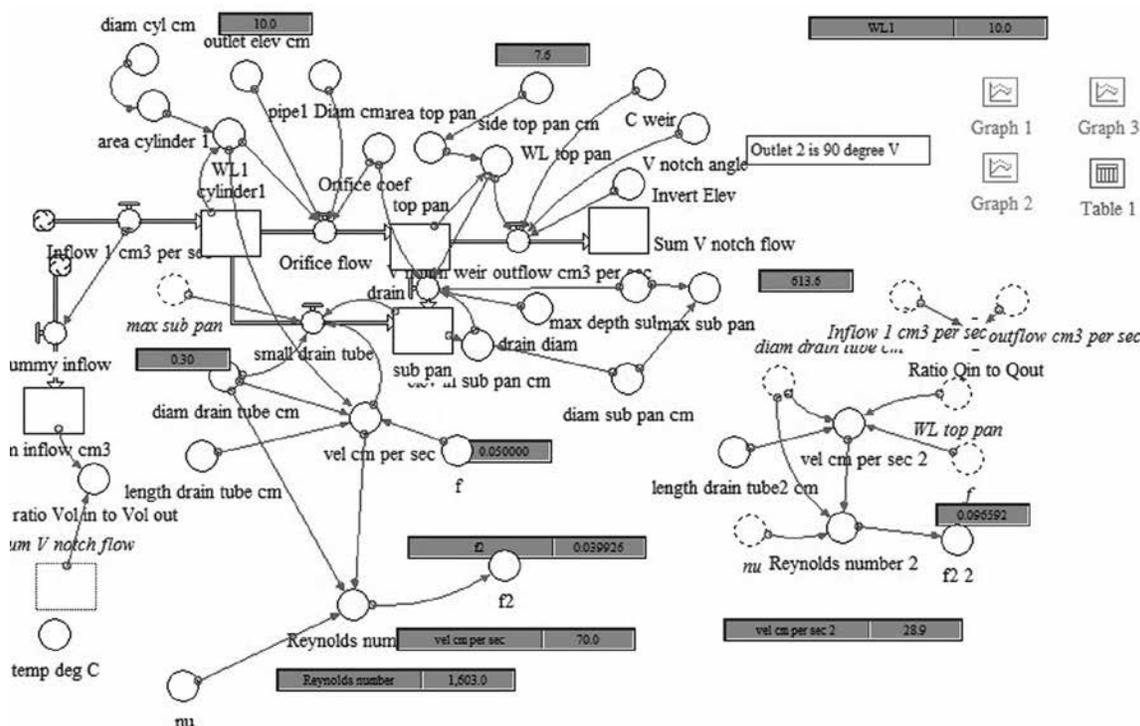


Figure 4. Model of the Hydrologic Black-Box, illustrating the *Stella*® model diagram.

Where:

- $q$  = Discharge [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]
- $\theta$  = Angle [degrees]
- $C$  = Coefficient of discharge [-]
- $H$  = Head [cm]
- $R$  = Hydraulic radius [cm]

The model was calibrated to determine the best values of coefficients (e.g. orifice coefficients and friction factor) to use in the model (table 1). This parameter evaluation step is a necessity in all mathematical models and illustrates the value in coupling measurements of the physical system with mathematical modeling.

### Results and discussion

Three simulated storms were applied to the Black-Box (table 2) of 75, 40 and 30  $\text{cm}^3/\text{s}$  separated by short intervals, and the outflows for the three storms were 2, 10 and 11  $\text{cm}^3/\text{s}$ , respectively.

Latter two more storms were added of 20 and 50  $\text{cm}^3/\text{s}$  separated by short intervals, and the outflows for the two storms were 19 and 45  $\text{cm}^3/\text{s}$ , respectively (table 3).

Figure 5 shows results of the *Stella*® Model in the form of rates of inflow *versus* V notch weir outflow.

Figure 6 shows results of the *Stella*® Model in the form of rates of inflow versus outflow (figure 6a) and adding two more storms of 20 and 50  $\text{cm}^3/\text{s}$  with outflows of 19 and 45  $\text{cm}^3/\text{s}$ , respectively (figure 6b).

The good fit between the inflow and outflow is shown by the high Square-R of 0.89 were the total volume of inflow versus total volume of outflow values predicted by the model are similar to the measured values for the different storms. However, critical analysis of the relationship reveals a logic error. Outflow decreases as inflow increases, in contrast to the established, logical relationship. Acquisition of additional data by applying more storms reveals

Table 1. Parameters of the Hydrologic Black-Box model applied with *Stella*®.

Name	Units	Value
Inflow Cylinder Diameter	cm	6.25
Outlet Elevation	cm	10
Pipe diameter	cm	2.54
Orifice coefficient	-	0.8
Pan diameter	cm	10
V notch weir outflow angle	degrees	90
Invert elevation	cm	2
Small Drain Friction factor	-	0.1
Small Drain tube diameter	cm	0.5
Small Drain tube length	cm	50
Drainage pipe diameter	cm	1.25
Drainage pipe depth	cm	5
Subpan diameter	cm	12.5
Soil porosity	Percent	0.05
Reynolds number	-	1603

Table 2. First simulated storms.

Storm #	Inflow (cm <sup>3</sup> /s)	Outflow (cm <sup>3</sup> /s)
1	75	2
2	40	10
3	30	11

Table 3. Two added simulated storms.

Storm #	Inflow (cm <sup>3</sup> /s)	Outflow (cm <sup>3</sup> /s)
1	20	19
2	50	45

that the three initial points, although physically and empirically correct, only represent a small part of the complex relationships between inflow and outflow. It is clear that the Black-Box model cannot accurately predict inflow-outflow relationships without much more data, including additional parameters such as the initial conditions at the start of a storm.

## Conclusions

Black-Box models are limited due to their inability to model basic governing processes such as conservation of mass and momentum in a system. Process-based models help in the analysis of a system under varied initial and boundary conditions. The combination of

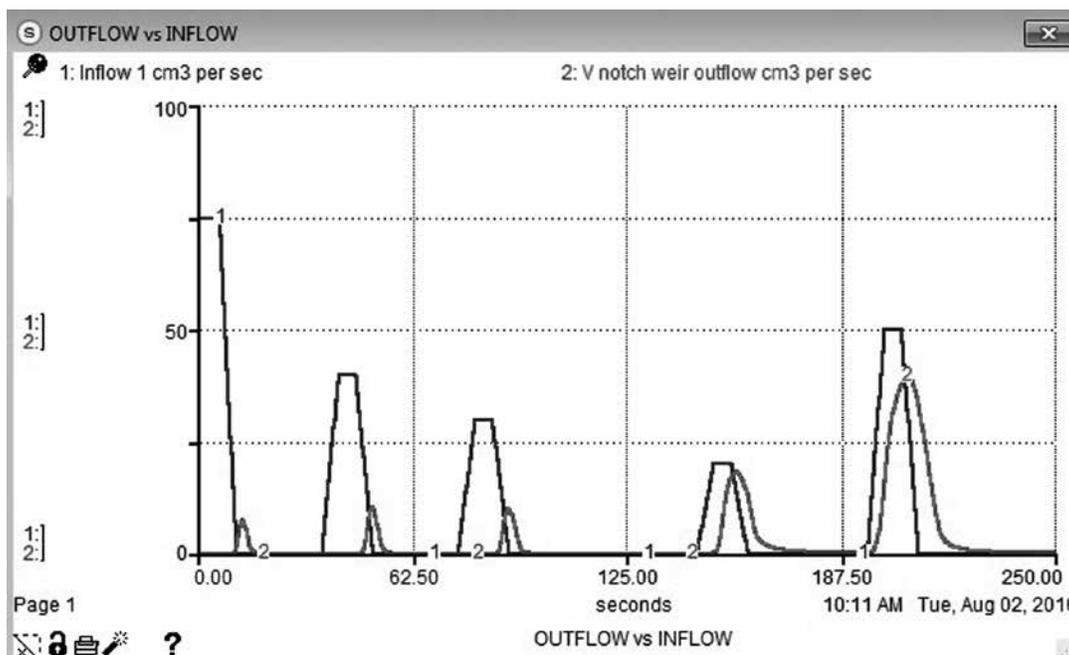


Figure 5. Results of the inflows and simulated V notch weir outflow from the *Stella*® model.

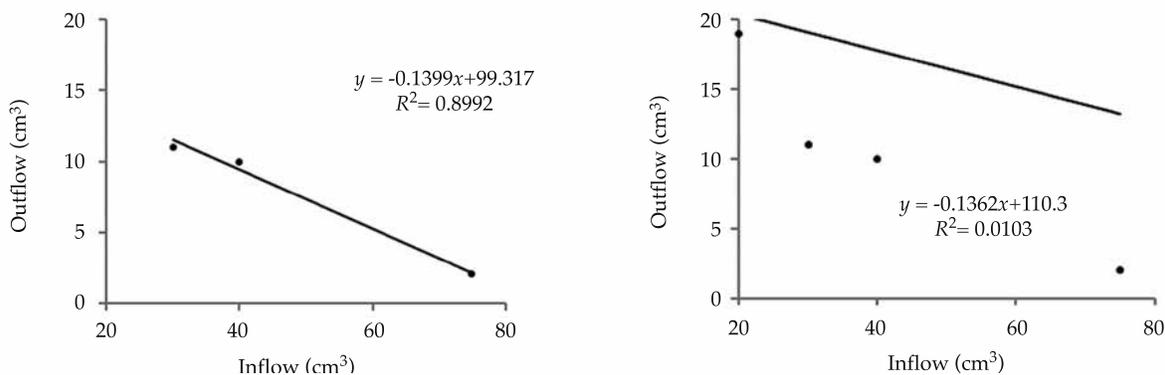


Figure 6. Results of Storms applied to Physical Black-Box Model, a) for three initial storms and b) for the total five storms.

physical measurements and a process-based mathematical model such as *Stella*® could help students to understand some of the limitations and uses of each approach. An understanding of the basic laws that rule the hydrologic processes in a system is usually critical to the proper

modeling and prediction of results under a variety of initial and boundary conditions. The typical Black-Box type of model is inherently limited due to a lack of understanding of the governing processes and inability to assess initial conditions which can lead to erroneous conclusions.

## Acknowledgements

We acknowledge the assistance and thanks to Nathalie I. Brandebourger for the review of the redaction of the manuscript.

## References

- Beven, K. (2002). Towards a coherent philosophy for modelling the environment. In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* (Vol. 458, No. 2026, pp. 2465-2484). The Royal Society.
- Brooks, K. N., Folliott, P. F., Greggersen, H. M., & Thames, J. L. (1991). *Hydrology and the management of watersheds*. Ames, USA: Iowa State Univ. Press.
- Brown, M. & Harris, C.J. (1994). *Neurofuzzy adaptive modelling and control*. New Jersey, USA: Prentice Hall. Upper Saddle River.
- Carson, E., & Cobelli, C. (2001). *Modelling methodology for physiology and medicine*. San Diego, USA: Academic Press.
- Chow, V. T. (1964). *Handbook of applied hydrology: A compendium of water resources technology*. New York: McGraw-Hill Companies.
- Chui, C.K. (1992). *An Introduction to Wavelets, Wavelet Analysis and its Application Vol. 1. 1, Boston, USA: Academic Press*.
- Daubechies, I. (1992). *Ten Lectures on Wavelets*. Series in Appl. Math., SIAM Publ.
- Devroye, L., & Györfi, L. (1985). *Nonparametric Density Estimation: the L1 View* Wiley. New York.
- Dym, C. L., & Ivey, E. S. (1980). *Principles of mathematical modeling*. New York: Academic Press.
- Eykhoff, P. (1974). *System identification-parameter and state estimation*. New York: Wiley.
- Ford, F.A. (1999). *Modeling the environment: an introduction to system dynamics models of environmental systems*. Washington D.C.: Island Press.
- Grayson, R.B., Moore, I.D. & McMahon, T.A. (1992). Physically based hydrologic modeling: 1. A terrain-based model for investigative purposes. *Water resources research*, 28(10): 2639-2658.
- Haykin, S. (1994). *Neural networks: A comprehensive foundation*: Macmillan college publishing company. New York.
- Hickey, J. T., & Diaz, G. E. (1999). From flow to fish to dollars: An integrated approach to water allocation. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 35(5): 1053-1067.
- ISEE Systems Inc. (2003). *See the world differently with the power of systems thinking software*. Recovered from <http://www.iseesystems.com>.
- Kirchner, J. W. (2006). Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology. *Water Resources Research*, 42(3): W03S04, DOI: 10.1029/2005WR004362.
- Klemeš, V. (1986). Dilettantism in hydrology: Transition or destiny? *Water Resources Research*, 22(9S): 177S-188S. DOI: 10.1029/WR022i09Sp0177S.
- Klemeš, V. (1988). A hydrological perspective. *Journal of Hydrology*, 100(1-3): 3-28. DOI: 10.1016/0022-1694(88)90179-5.
- Kung, S.Y. (1993). *Digital neural networks*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River.
- Ljung, L. (1987). *Theory for the User*. New Jersey: Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River.
- Meyer, Y. (1990). *Ondelettes et Operateurs*. Hermann, Paris.
- Penman, H. L. (1961). Weather, plant and soil factors in hydrology. *Weather*, 16(7): 207- 219. DOI: 10.1002/j.1477-8696.1961.tb01934.x.
- Pollak, H. (2012). Introduction: What is mathematical modeling? Teachers College, Columbia University. Professor notes: [http://www.comap.com/modelingHB/Modeling\\_HB\\_Sample.pdf](http://www.comap.com/modelingHB/Modeling_HB_Sample.pdf).
- Quarteroni, A. (2009). Mathematical models in science and engineering. *Notices of the AMS*, 56(1): 10-19.
- Rudra, R. P., Dickinson, W. T., Abedini, M. J., & Wall, G. J. (1999). A multi-tier approach for agricultural watershed management. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 35(5): 1059-1070.
- Ruskai, M.B., Beylkin, G. & Coifman, R. (1992). *Wavelets and their Applications*. Jones and Bartlett Books in Mathematics, Boston: Jones and Bartlett, 1992, edited by Ruskai, Mary B.; Beylkin, Gregory; Coifman, Ronald.
- Silverman, B.W. (1986). *Density estimation for statistics and data analysis* (Vol. 26). London: CRC press.
- Singh, V. P. (1995). *Computer models of watershed hydrology*. Littleton, USA: Water Resources Publications.
- Singh, V. P., & Woolhiser, D. A. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of hydrologic engineering*, 7(4): 270-292.
- Sjöberg, J., Zhang, Q., Ljung, L., Benveniste, A., Delyon, B., Glorennec, P. Y., Hjalmarsson, H., & Juditsky, A. (1995). Nonlinear Black-Box modeling in system identification: A unified overview. *Automatica*, 31(12): 1691-1724.
- Soderstrom, T. & Stoica, P. (1989). *System Identification*. New Jersey: Prentice-Hall. Upper Saddle River.
- Stone, C.J. (1982). Optimal global rates of convergence for nonparametric regression. *The annals of statistics*, pp.1040-1053.
- Van Waveren, R. H., Groot, S., Scholten, H., Van Geer, F., Wösten, H., Koeze, R., & Noort, J. (2000). *Good modelling practice handbook*. Lelystad, The Netherlands: STOWA, Utrecht, RWS-RIZA.
- Wang, L. (1994). *Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and Stability Analysis*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Wurbs, R. A. (1998). Dissemination of generalized water resources models in the United States. *Water Int.*, 23(3): 190-198. DOI: 10.1080/02508069808686767.

Zin, I. (2002). *Incertitudes et ambiguïté dans la modélisation hydrologique: discussion, développements méthodologiques et application à l'hydrologie de crue en Ardèche*. Doctoral dissertation. Grenoble: L'Institut Polytechnique de Grenoble.

### Institutional address of the authors

*Juan M. Stella*

Ph.D., Researcher  
Tecnológico de Monterrey  
Eugenio Garza Sada 2501, 64849 Monterrey, N.L., MÉXICO  
Phone number: +52(81) 8358 2000, ext. 5561  
juan.stella@itsm.mx

*Glenn S. Warner*

Ph.D., Associate Professor  
Department of Natural Resources & Management  
Engineering  
University of Connecticut  
Storrs, CT-06269, USA  
Phone number: +1 860 486 0140  
Glenn.Warner@uconn.edu

# Avances y limitantes en el tratamiento del agua residual del estado de Zacatecas

• Patricia Rivera\* •

*Colegio de la Frontera Norte, Tijuana, México*

\*Autor para correspondencia

• Refugio Chávez •

*Universidad de Estrasburgo, Estrasburgo, Francia*

• Fabiola Rivera Salinas •

*Junta Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado de Zacatecas, Zacatecas, México*

DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-08

## Resumen

Rivera, P., Chávez, R., & Rivera-Salinas, F. (enero-febrero, 2018). Avances y limitantes en el tratamiento del agua residual del estado de Zacatecas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(1), 113-123, DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-08.

El tratamiento del agua residual y el que ésta cumpla la(s) norma(s) establecida(s) es uno de los grandes retos gubernamentales. Sin embargo, los diferentes contextos demandan acciones acordes con las necesidades y características de cada lugar. En los últimos diez años, en el estado de Zacatecas, México, se han construido una serie de plantas de tratamiento con el objetivo de contribuir al saneamiento de las cuencas hidrológicas. Sin embargo, a pesar de estos avances en la infraestructura, es necesario analizar el funcionamiento y tratamiento de las plantas estatales, a fin de clarificar los retos en la materia. Para efectuar este trabajo se consultaron cuatro fuentes clave: *Inventario y situación actual de las plantas de tratamiento del estado de Zacatecas* (Rivera-Salinas, 2011); el *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación* (Conagua, 2011); el *Diagnóstico de las plantas de tratamiento de agua residual* (PTAR, 2014) y, finalmente, el *Inventario de la Secretaría de Agua y Medio Ambiente* (SAMA, 2017). Se encontró que sólo un 53% de las plantas opera, el resto presenta problemas diversos que muestran la incapacidad municipal para paliar los problemas de tratamiento (p. ej., plantas obsoletas, bajo nivel de tratamiento, incapacidad financiera de los municipios y personal no capacitado, entre otros), obligando al gobierno a intervenir y centralizar el tratamiento en zonas urbanas, con plantas con tecnología avanzada. Ello significa una no eficiente descentralización de servicios y una baja coordinación entre municipios, factores indispensables a retomar en una planificación de mediano y largo plazos.

**Palabras clave:** agua residual, sistemas de tratamiento, inventario, estado de Zacatecas.

## Abstract

Rivera, P., Chávez, R., & Rivera-Salinas, F. (January-February, 2018). Advances and limitations in the treatment of wastewater in the state of Zacatecas. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 9(1), 113-123, DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-08.

*Making the waste water treatments meet the established standards is one of the greatest challenges the government faces. However, different contexts accordingly require that actions meet the needs and characteristics of each specific location. In the state of Zacatecas, Mexico a number of treatment plants have been built within the past 10 years with the aim of ensuring sustainable watersheds. However, despite these advances in infrastructure, it is necessary to analyze the performance and treatment of municipal plants in order to clarify the challenges in the field. In the development of this work, four key sources were consulted: Inventario y situación actual de las plantas de tratamiento del estado de Zacatecas (Rivera-Salinas, 2011); Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación (Conagua, 2011); Diagnóstico de plantas de tratamiento de agua residual (PTAR, 2014); and the Inventario de la Secretaría de Agua y Medio Ambiente (SAMA, 2017). We found that only 53% of the plants operate, the rest have various issues which show the municipalities inability to alleviate the problems of treatment (ranging from obsolete plants, low maintenance, insufficient funds, untrained personnel, etc.), forcing the state to intervene and centralize treatment in urban areas with advanced technology plants. The results show a non-efficient decentralization of services and little coordination between municipalities, which are essential factors in medium and long-term planning.*

**Keywords:** Wastewater, treatment systems, inventory, state of Zacatecas.

Recibido: 14/10/2015

Aceptado: 05/07/2017

## Introducción

El crecimiento poblacional ha generado una mayor demanda e impacto en recursos naturales como el caso del agua. Desde tiempos antiguos, los ríos, lagos y mares recogen las basuras producidas por la actividad humana; estas descargas indiscriminadas, junto con la sobre-extracción y la baja capacidad de tratamiento del recurso, han generado una gran contaminación del agua, que se ha agudizado con el paso de los años.

Según datos de la OMS (2014), 2 500 millones de personas carecen de acceso a saneamiento mejorado. En los países en desarrollo, más del 80% del agua residual se descarga sin tratamiento. De acuerdo con el Banco Mundial (2014), entre 70 y 75% del agua residual de Latinoamérica vuelve a los cuerpos de agua sin tratamiento alguno, creando un serio problema ecológico y de salud pública. Esta cifra es particularmente preocupante si consideramos que 80% de la población vive en ciudades, y gran parte de ella en asentamientos cercanos a fuentes contaminadas.

Aunque desde hace ya varias décadas, siguiendo normativas internacionales y atendiendo necesidades nacionales y contextos locales, los gobiernos y las agencias encargadas del manejo del agua han colocado el proceso de tratamiento del agua residual como prioridad y estrategia central para mejorar la calidad de vida, proteger la salud pública y avanzar hacia el desarrollo sostenible, las metas no han podido ser alcanzadas. En México, la cobertura de alcantarillado en 2012 alcanza el 90.5%. El caudal tratado durante la última década se ha incrementado a nivel nacional a más de 100%, al pasar de 64.5 m<sup>3</sup>/s en 2004 a 105.9 m<sup>3</sup>/s en 2013, con 2 287 plantas municipales. No obstante, las aguas no tratadas aún representan el 49.8% del total (Conagua, 2014), esto da cuenta de los enormes rezagos que subsisten en el país.

De acuerdo con Lahera (2010), el tratamiento de agua es un proceso inacabado por cuatro aspectos principales: poblacional, tecnológico, económico y político-normativo. El aspecto poblacional, con su consecuente urbanización,

presiona la demanda de agua, es decir, el caudal utilizado que no se trata aumenta y genera un problema de desecho inadecuado.

El aspecto tecnológico es muy importante en relación con las técnicas de tratamiento utilizadas y su grado de complejidad. Según la Conagua (2014), 57.3% del total de las plantas de tratamiento a nivel nacional utiliza el tratamiento por lodos activados. Lahera (2010) indica que este método hace uso intensivo de productos químicos y de energía, genera emisiones de contaminantes al aire (amoníaco) y produce cantidades de lodos tóxicos, cuya disposición final no está garantizada (a pesar de la existencia de la NOM-004 de biosólidos).

En cuanto al aspecto económico, se encuentra que la infraestructura disponible para el tratamiento de aguas no cubre las necesidades. En México, la infraestructura sólo recolecta 50.2% del total (Conagua, 2014) y su operación es ineficiente. Existe una sobre y subutilización de recursos, esto es, algunas plantas operan con deficiencias y tratan un flujo mayor a su capacidad instalada, mientras que otras tienen una capacidad instalada mayor al flujo de aguas residuales que capturan (la capacidad instalada total nacional es de 1 52.17 m<sup>3</sup>/s, aunque el caudal tratado es apenas de 105.93 m<sup>3</sup>/s (Conagua, 2014: 105), esta planeación poco efectiva implica que los costos sean superiores. A pesar de que la regulación fomenta la agrupación intermunicipios para ahorrar costos, la mayoría de plantas está asignada a municipios de manera individual. Aunque la operación y mantenimiento es responsabilidad municipal, la construcción de plantas puede ser apoyada de manera estatal o federal (como por distintas instancias: Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento en Zonas Urbanas, APAZU; Programa para la Construcción y Rehabilitación de Sistemas de Agua Potable y Saneamiento en Zonas Rurales, Prossapys; y, Programa de Tratamiento de Aguas Residuales, Protar), pero los costos de operación y mantenimiento son responsabilidad municipal y buena parte de los municipios no tiene la solvencia necesaria ni prioriza el manejo de sus plantas.

El tratamiento del agua tampoco reviste de reconocimiento ecológico ni se potencian los beneficios que podría implicar la entrada de dinero en el uso y venta de agua tratada en usos no potables (Lahera, 2010). Además, un gran porcentaje de la población no tiene la posibilidad de asumir incrementos de costos por el tratamiento (se requieren estrategias tarifarias y la revisión de la inequidad en los servicios).

En materia política-normativa se privilegia la rentabilidad política. Así, frente a recursos presupuestales insuficientes, se considera prioridad la dotación de agua potable y la construcción de la red de drenaje frente a medidas de saneamiento, pues las primeras representan un mayor capital electoral y la expansión de la red de influencia sobre las comunidades (Carabias, Landa, Collado, & Martínez, 2005; Islas & Sainz, 2007; Aguilar, 2010). Aunque innegablemente en el aspecto político-normativo inciden el cumplimiento normativo y las sanciones propuestas.

Si bien el saneamiento del agua residual implica diferentes fases interrelacionadas que es necesario asegurar (recolección, transporte, tratamiento y adecuada disposición a los cuerpos receptores), este trabajo se centrará específicamente en el análisis del tratamiento, porque consideramos que tiene mayor rezago. El objetivo es aportar elementos (mayoritariamente cualitativos, pues la información sobre las plantas de tratamiento en la entidad no es uniforme) a la valoración de su funcionamiento y tratamiento, y a la búsqueda de alternativas en el manejo del agua residual en el estado de Zacatecas, México. Este manuscrito se divide en cuatro apartados. Primero, se señala brevemente la metodología utilizada para realizar este trabajo. Segundo se efectúa un diagnóstico inicial que señala el funcionamiento de las plantas de tratamiento en el estado de acuerdo con la información recabada. Se construye un tercer apartado de análisis, donde se incorporan los tipos de tratamiento utilizados en el estado y su relación con su ubicación. Finalmente, en el cuarto apartado, conclusiones, se analizan las limitantes que prevalecen en las plantas de tratamiento y se agrupan en los cuatro ejes

propuestos por Lahera (2010), pero aplicados al caso estatal.

## Metodología

Este trabajo se construye a partir de la tesis de maestría de Rivera-Salinas (2011), que elabora un inventario de las plantas de tratamiento del estado de Zacatecas. En este trabajo, la autora georreferencia las plantas de tratamiento del estado, las caracteriza de acuerdo con su tipo de tratamiento, señala en su gran mayoría su cumplimiento normativo, construye un archivo fotográfico, y, finalmente, identifica y precisa medidas de rehabilitación en las plantas que lo requieren. Este trabajo de maestría fue el insumo para los posteriores inventarios de las plantas del estado: *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación* (Conagua, 2011); *Diagnóstico de las plantas de tratamiento de agua residual* (PTAR, 2014), y el *Inventario de la Secretaría de Agua y Medio Ambiente* (SAMA, 2017).

A partir de la revisión de estos cuatro inventarios se realizó un análisis anual de las plantas de tratamiento y se clasificó las plantas de tratamiento con base en su grado de funcionamiento en cuatro tipos: plantas operando satisfactoriamente, plantas operando, plantas operando con deficiencias y plantas fuera de operación (figura 2) (cabe señalar que en la figura 2 también se incorporaron plantas en estabilización y plantas en construcción, porque ya las tienen contabilizadas los inventarios revisados). Las plantas operando satisfactoriamente son aquellas que cumplen la NOM-001 (algunas se acercan al cumplimiento de la NOM-003), y están en buenas condiciones de limpieza y mantenimiento. Las plantas operando son aquellas que lo hacen aceptablemente, pero no a su nivel óptimo. Las plantas operando con deficiencias se caracterizan por contar con dificultades mayores, como falta de mantenimiento y azolve, necesidad de construcción de ciertas áreas básicas, zonas inundadas, problemas financieros e, incluso, algunas plantas pequeñas con problemas para incorporar a los usuarios a su red. Por último,

las plantas fuera de operación, como su nombre lo indica, no operan y en su gran mayoría la infraestructura está en condiciones deplorables.

Una segunda clasificación de la plantas se realizó de acuerdo con sus tipos de tratamiento, tomando como base la clasificación de Conagua (2007), que los divide en tratamiento primario, secundario y terciario. En el tratamiento primario se eliminan por medios físicos los sólidos en suspensión y se reduce en cierto porcentaje la demanda bioquímica de oxígeno (procesos de sedimentación y flotación en lagunas); en el tratamiento secundario se remueven materiales orgánicos coloidales y disueltos mediante procesos naturales y químicos (sistema de filtros biológicos, reactores anaerobios, lagunas de estabilización y lodos activados); y, por último, el tratamiento terciario remueve materiales disueltos, como gases, sustancias orgánicas naturales y sintéticas, iones y bacterias, y virus (intercambio iónico, ósmosis inversa, oxidación avanzada, electrodesinfección, etc.).

### El tratamiento de agua en Zacatecas

El estado posee una extensión de 74 502 km<sup>2</sup>, distribuidos en 58 municipios, que albergan un total de 4 672 localidades y 34 acuíferos con disponibilidad. Al 2013, la población total era de 1.55 millones, y al 2030 se espera que sea de 1.73 (INEGI, 2014). El estado tiene un aspecto poblacional interesante: existe un contraste entre las pocas zonas urbanas en crecimiento y un gran número de municipios pequeños con poca población o con población en declive, lo que puede explicar en parte el descuido en

la provisión de servicios: cobertura de agua potable 94.31% estatal, y alcantarillado 89.07% estatal. Si se subdivide en urbano y rural, se encuentra que el sector rural tiene un 88.42% de cobertura de servicios de agua potable y 76.69% de servicio de alcantarillado, lo que representa una menor provisión de servicios que el sector urbano, que cuenta con 98.4% y 97.6% de servicios, respectivamente (Conagua, 2014).

Según INEGI (2011), el estado de Zacatecas ha pasado de estar entre los cinco estados más atrasados en materia de conexión al drenaje en 1990, sólo precedido por Campeche, Guerrero, Nayarit y Yucatán, a alcanzar un 85.3% del total de las viviendas particulares con este servicio en 2015. En el cuadro 1 se muestra el avance de viviendas con drenaje, siempre menor que los porcentajes nacionales. Actualmente el estado genera 4 545.4 lps de agua residual (1.98% de las aguas generadas en el país, ocupando el lugar 21 nacional) y recolecta 4 117.8 lps (lugar 19 nacional); es decir, 427.6 lps son vertidos en sitios no aptos, provocando contaminación (INEGI, 2014).

A pesar de que la dotación de drenaje a las viviendas estatales ha mejorado, el avance en el tratamiento no ha tenido la misma suerte. Según la Semarnat (2013), el volumen de agua residual producido fue de 44.59 hm<sup>3</sup>: 3.77 hm<sup>3</sup> de fuente industrial y 40.82 hm<sup>3</sup> de origen municipal; de éstos, alrededor del 70% (31.44 hm<sup>3</sup>) no recibe tratamiento. La capacidad instalada de tratamiento de las plantas municipales en el estado de Zacatecas es de 1194.6 lps —representa sólo el 0.85% en comparativa nacional— (INEGI, 2014). Aunque el caudal tratado difiere de la

Cuadro 1. El avance de viviendas con drenaje en Zacatecas comparado con datos nacionales 1990-2010.

Año	Zacatecas (%)	Nacional (%)
1990	46.3	62
2000	68.2	75
2005	84.4	85
2010	89.0	89.1
2015	85.3	92.8

Fuente: elaboración propia con datos de INEGI, 2011 y 2015.

Cuadro 2. Comparativa estatal respecto al avance nacional de agua residual y plantas de tratamiento municipal e industrial.

Concepto	Nacional	Estatal	Porcentaje estatal (%)	Lugar
Agua residual generada (lps)	229 734.5	4 545.5	1.98	21
Agua residual colectada (lps)	210 169.4	4 117.8	1.96	19
Plantas municipales de tratamiento en operación	2 342	73	3.11	11
Capacidad instalada (lps)	140 142.1	1 194.6	0.85	29
Caudal tratado (lps)	99 750.2	1 049	1.05	26
Cobertura de tratamiento (%)	47.5	25.5	25.5	26
Plantas de tratamiento industrial en operación	2 530	15	0.59	26
Capacidad instalada (lps)	74 934	157.3	0.21	30
Caudal en operación (lps)	60 532	48	0.80	31
Participación respecto al agua residual generada (%)	26.3	1.1	1.1	31

Fuente: INEGI, 2014.

capacidad, es decir, si se colectan 4 117.8 lps y sólo son tratados 1 049, la capacidad instalada (25.47%) está muy por debajo de sus requerimientos y se ubica en el lugar 26 nacional (cuadro 2). También es relevante señalar que el saneamiento proveniente de la industria es incipiente, con apenas un 1.1%, colocando al estado en último lugar nacional en caudal en operación.

En relación con la información más reciente sobre plantas de tratamiento, el Inventario SAMA (2017) tiene registradas 69 plantas operando, 20 plantas fuera de operación y seis en proceso de construcción. Del total de las plantas construidas en el estado, 31 se encuentran en zonas urbanas y 61 en zonas rurales, tres son plantas privadas (las plantas privadas son Bernardez, Zona Militar y Minera Proaño en Fresnillo). Las plantas se distribuyen a lo largo de 58 municipios. Fresnillo es el municipio con mayor número de plantas de tratamiento (seis); Pinos y Tabasco con cuatro plantas cada uno; Genaro Codina, Sain Alto, Villa García y Villanueva con tres plantas cada uno (figura 1).

A partir de la clasificación elaborada y mencionada en la metodología, se encontró que de las 96 plantas construidas en el estado de 2004 a la actualidad, 34% de las plantas opera satisfactoriamente; un 19% opera de manera aceptable, pero no a su nivel óptimo, con algunas limitantes

por subsanar. Estos dos grupos sumados son el 53% del total estatal (o 57 plantas). Es decir, más de la mitad de las plantas de tratamiento del estado está en operación.

En contraparte, el 13% opera con deficiencias. De acuerdo con SAMA (2017), estas 12 plantas están en proceso de causar baja de inventario por abandono de las autoridades locales y la falta de interés en la operación y mantenimiento; el 21% de las plantas está fuera de operación. Por último, en los años 2014-2016 se encuentran en proceso de prueba siete plantas y seis en construcción, que representan el 14% del total. Indica SAMA que incluyendo toda la infraestructura construida hasta la actualidad, el estado tendrá la capacidad de tratar 81% del agua residual de Zacatecas. Es importante señalar que de 2014 a 2016 se encontraron en proceso de construcción seis plantas (dos de ellas en proceso de entrega-recepción que después seguirán al proceso de estabilización) y siete en proceso de estabilización; esto último significa que las plantas están trabajando, pero todavía no a su nivel óptimo; operan buscando su nivel de lodo adecuado y su tiempo de retención hidráulico óptimo, hasta llegar a tener un trabajo continuo, donde el resultado de calidad de agua al momento de salida sea el proyectado o cumpla con la normatividad establecida.



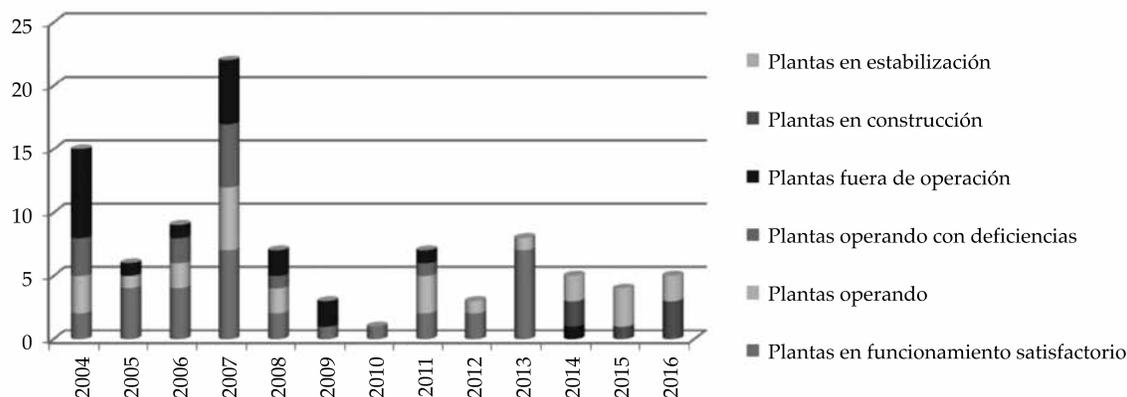


Figura 2. Plantas de tratamiento según nivel de operación anual.

Fuente: elaboración propia con base en SAMA, 2017.

las plantas en operación cumplen (sólo en lo general) la NOM-001, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales, y algunas se acercan a la NOM-003, que se enfoca en el reúso de agua, al establecer los límites permisibles para reutilizar el agua en servicios al público. Sobre la NOM-002 y NOM-004, la primera referida a descargas al alcantarillado y la segunda sobre lodos y biosólidos (Semarnat, 2014), no se encontró información disponible.

A pesar de no existir un patrón anual, el factor demográfico, en particular la urbanización, explica la instalación y el funcionamiento de las plantas. Si se analizan los datos de funcionamiento, se encuentra que en el grupo de plantas que operan satisfactoriamente (total de 32 plantas), un 66 % de ellas se encuentra atendiendo a zonas urbanas. El 34% restante se ubica en poblaciones de menos de 2 500 habitantes.

El grupo de plantas que opera (sin llegar a cumplir la normatividad) representa un 33% para poblaciones urbanas, mientras que el restante 67% para poblaciones rurales. En el grupo de plantas que operan con deficiencias (20 plantas) encontramos que el 83% se encuentran en poblaciones rurales. El último grupo de plantas fuera de operación acentúa totalmente esta tendencia y vemos cómo un 95% de las

plantas que no está operando se ubica en zonas rurales.

### Procesos de tratamiento de aguas residuales municipales

Además del funcionamiento, los procesos de tratamiento (para información técnica referente tanto a los métodos como a sus limitantes, consultar a Rodríguez, 2008, Mansur, 2000, y Oropeza, 2006) en el estado son determinantes para avanzar en la eficiencia. De acuerdo con la clasificación de tratamiento propuesto por Conagua (2007): primario, secundario y terciario (cuadro 3). En el estado de Zacatecas un 28% utiliza el proceso primario. Éste se ejemplifica con el tratamiento lagunar (almacenaje en excavaciones poco profundas), y representa el segundo método más común (Rodríguez, 2008, p. 46). Las plantas de tratamiento basadas en el sistema lagunar tienen algunas variaciones como humedal y parcialmente aireado. El tratamiento lagunar es una excelente alternativa para el manejo del agua residual en pequeñas comunidades, aunque su eliminación de nutrientes y microorganismos es baja (Rodríguez, 2008, p. 66).

En relación con el tratamiento secundario, se encontró que un 46% de las plantas del estado

Cuadro 3. Tipo de tratamiento utilizado en las plantas.

Clasificación	Sistema	Subtipo	Núm. de plantas	Subtotal	Porcentaje (%)
Primario	Lagunar			19	28
		Simple (13); biofiltros (1); con humedal (1); y parcialmente aireado (4) b	19		
Secundario				31	46
	Filtros biológicos		1		
	Lodos activados	Simple (3), alta tasa (3) y burbuja fina (1)	7		
	RAFA	Simple (12), biofiltro estático (3), humedal (5), dual (1)	21		
	Dual	Lagunar con lodos activados	2		
Terciario	Bioenzimático			18	26
		Simple	16		
		Con humedal	2		
Total			68	68	100

Fuente: elaboración propia con información de Conagua, 2014.

utiliza este proceso, es decir, es el tratamiento predominante. De este total, 30% de las plantas usa el reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA). El método también presenta variaciones, como el biofiltro estático o con sistema dual. Por tratarse de un proceso simple, compacto y de instalación barata constituye una alternativa muy interesante. No obstante, su operación y mantenimiento precisa de costos mayores, por ello, la principal desventaja de este tratamiento es que su vida útil real está determinada por el mantenimiento a las estructuras, el espacio disponible y el crecimiento del afluente tratado (Mansur, 2000).

Sigue en importancia (del segundo grupo) el método por lodos activados (10.1%). Se trata de un proceso muy común por su relativa sencillez, que involucra una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos. No obstante, este método necesita de un control de operación muy elevado y requiere de un uso intensivo de productos químicos y de energía; genera emisiones de contaminantes al aire y tiene como residuo grandes cantidades de lodos tóxicos que deben ser estabilizados, espesados y desinfectados antes de su disposición final, lo cual precisa de infraestructura costosa (Oropeza, 2006, p. 66). Se encuentran variaciones de este método

como lodos activados de alta tasa y de burbuja fina. Dentro del tratamiento secundario se tiene también el método de filtros biológicos, que sólo representa el 1.45 % de las plantas.

Del tercer grupo de tratamiento podemos mencionar el método bioenzimático (tercero más usado, con un 26%), constituido por una serie de procesos unitarios integrados con funciones físicas, biológicas y químicas. Su instalación, como suelen ser prefabricadas, no precisa de grandes extensiones, pues el proceso consiste en degradar la materia orgánica de manera acelerada (Bioingeniería Sanitaria, 2015). Sin embargo, una limitación es que su proceso se realiza en un tanque, y no puede recibir detergentes, disolventes u otras sustancias cáusticas, pues dañarían el proceso anaeróbico.

Al final, los métodos predominantes parecen ser seleccionados por su facilidad de operación y mantenimiento, ya que permiten el menor uso de recursos para el tratamiento, no sólo de terreno empleado sino de energía eléctrica y sustancias químicas, y tratan de disminuir los desechos en su proceso, es decir, se busca, en su mayoría, sistemas menos costosos de construir y operar, pero es necesario señalar que eventualmente fracasan y sus limitantes suelen ser los altos costos de operación y mantenimiento,

y en el largo plazo tienen un costo mayor que aquellos de tecnologías más avanzadas.

## Conclusiones

A lo largo de los años, la población y el crecimiento urbano han sido la base para la asignación de las plantas de plantas de tratamiento de aguas residuales en el estado de Zacatecas. Esta asignación es visible tanto en el establecimiento de plantas de mayor capacidad de tratamiento como en términos de mantenimiento y operación. En años recientes, el avance en infraestructura ha sido considerable con la construcción de grandes plantas en zonas urbanas. No obstante, prevalecen retos significativos que podemos aglutinar en cuatro categorías que de manera conjunta explican o inhiben el funcionamiento y eficiencia de las plantas de tratamiento en el estado de Zacatecas.

La primera categoría puede ser dividida en dos aspectos económicos importantes. Un primer aspecto se refiere a la tendencia (quizás más frecuente en los municipios pequeños) en los cortes o cambios administrativo-financieros municipales, por encontrarse en condiciones desfavorables para enfrentar los costos de operación, como el pago de energía eléctrica, la disponibilidad de recursos para la construcción, rehabilitación y mantenimiento de la infraestructura, adquirir los reactivos químicos para la operación, cubrir la falta de capacitación del personal operativo, etcétera. El segundo aspecto se refiere a la dificultad de poder incorporar en el pago del agua potable el costo de los servicios de saneamiento, ya sea por incapacidad financiera de las comunidades o por la baja redituabilidad política de la medida.

En relación con lo anterior, la Comisión Estatal de Agua Potable y Alcantarillado (CEAPA) afirma que el gobierno federal destina a los ayuntamientos 50 centavos por cada metro cúbico de agua residual tratada, mismos que deben ser invertidos en la misma planta tratadora. Sin embargo, esta cantidad no es reclamada por los municipios. Es necesario ajustarse a la normatividad existente, a fin de contar con recursos

económicos para un adecuado funcionamiento. Así, la CEAPA afirma que los municipios utilizan las plantas por temporadas y no brindan un servicio regular; entre un 15 y 20% de las plantas libera agua sin tratar a los vasos lacustres de la entidad, haciéndose acreedoras a una sanción económica y generando un gasto adicional al ayuntamiento (Regalado & Alonzo, 2012).

La segunda categoría se refiere al hecho de las restricciones conjuntas económico y político-normativo a nivel municipal. El tratamiento de aguas es una obligación que recae en los municipios, sin embargo, dicha delegación de facultades en la mayoría de los casos no va aparejada con capacidades técnicas y financieras, limitando los avances. En el caso estatal se evidencia una mayor atención a la construcción de grandes plantas de tecnología avanzada, donde se da prioridad a plantas más especializadas y al transporte de agua hasta ellas. Un ejemplo es el caso de la planta Osiris, en la zona conurbada Zacatecas-Guadalupe, que incrementó en un 23.19% la capacidad de tratamiento en el estado. Pero también persisten otras limitantes, como la ineficiencia en la contratación de personal sobre o subcalificado para operarlas y mantenerlas, el pago de cuotas altas por consumo de energía eléctrica y por la disposición final de sus residuos, etcétera.

La tercera categoría se refiere al fracaso en la descentralización de las políticas públicas en los diferentes niveles de gobierno, al privilegiar a los centros de mayor población sobre los municipios pequeños y con baja densidad poblacional. Si bien los problemas de las zonas urbanas son más relevantes porque tienen mayor población, no hay que olvidar que el saneamiento en comunidades pequeñas conlleva costos mayores y los presupuestos asignados deben reflejar esto, que de acuerdo con Pombo (2004) podrían superar valores de 15 a 1.

Si se realiza un balance comparativo respecto a la contaminación generada en la zona urbana y en la zona rural, es evidente que la mayor concentración se encuentra en las áreas urbanas. Esto justifica, en cierta medida, la atención en ellas. Sin embargo, uno de los problemas de

esta concentración urbana puede implicar que los habitantes de zonas rurales, que dependen a menudo de servicios públicos comunales sin alcantarillado o utilizan los recursos abiertos disponibles, están expuestos a mayores niveles de contaminación.

La cuarta categoría es de carácter técnico y se relaciona con el funcionamiento de las plantas. El problema más recurrente, con base en la información de PTAR (2014), es el mantenimiento de las plantas, derivado de la corrosión del material, mismo que es necesario integrar en una urgente planificación. Aunque en plantas más recientes se han encontrado otro tipo de deficiencias, como la baja incorporación de la población a la red y los escasos presupuestos (como mencionan los funcionarios municipales) para los pagos operativos, que denotan las bajas capacidades municipales.

Cabe señalar que la información obtenida de las plantas no permite elaborar análisis puntualizados, pues los datos que aporta cada planta son diferentes entre sí. Destaca también la capacitación inadecuada del personal que labora en ellas y la escasa consideración a los periodos de vida de cada planta.

En conjunto, estos problemas y sus interrelaciones evidencian una incapacidad estatal en la prestación de servicios, denotando una descentralización de funciones deficiente, donde los discursos van siempre avanzando y las realidades se rezagan. Como propuesta, se plantea una planificación a mediano y largo plazos, donde la información de las plantas se refleje en un sistema de información periódico, público y accesible, que permita conocer el desempeño de las PTAR a la luz de las normativas que vigilan su funcionamiento.

## Referencias

- Aguilar, E. (2010). *Normatividad de los servicios de agua y saneamiento en México: los casos de Chiapas, Tabasco y Veracruz*. México, DF: CEPAL.
- Bioingeniería Sanitaria (2015). *Funcionamiento del proceso de tratamiento bioenzimático*. Recuperado de <http://www.bioingenieriasanitaria.com.mx>.
- Carabias, J., Landa, R., Collado, J., & Martínez, P. (2005). *Agua, medio ambiente y sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México*. México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México, El Colegio de México y Fundación Gonzalo Río Arronte.
- Conagua (2007). *Estadísticas del agua en México*. México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Comisión Nacional del Agua.
- Conagua (2011). *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación*. México, DF: Comisión Nacional del Agua. Recuperado de <http://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/infraestructurahidraulica/Normas/SGAPDS-INVENTRIO%202011%20FINAL.pdf>.
- Conagua (2014). *Estadísticas del agua en México*. México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Comisión Nacional del Agua.
- INEGI (2011). *Territorio, agua potable y drenaje*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/dispon.aspx?tema=T>.
- INEGI (2014). *Perspectiva estadística de Zacatecas*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI (2015). *Encuesta Intercensal*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/zac/poblacion/vivienda.aspx?tema=me&e=32>.
- Islas, I., & Sainz, J. (2007). Esquemas de cobro por servicio de agua potable en los municipios de México: restricciones institucionales y oportunidades de política pública. *Gaceta ecológica del INE*, 82, 37-47.
- Lahera, V. (2010). Infraestructura sustentable: las plantas de tratamiento de aguas residuales. *Quiévera*, 12(2), 58-69.
- Mansur, M. (10 de diciembre de 2000). *Tratamiento de aguas residuales en reactores anaeróbicos de flujo ascendente en manto de lodos*. Hojas de divulgación técnica # 27. Washington, DC: OMS. CEPIS. Recuperado de <http://www.bvsde.ops-oms.org/eswww/proyecto/repidisc/publica/hdt/hdt27/hdt027.html>.
- OMS (2014). *Progress on drinking water and sanitation*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.
- Oropeza, N. (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos Conciencia*, 1, 51-58.
- Pombo, A. (2004). *Tijuana: agua y salud ambiental (sus estrategias)*, Tijuana: El Colegio de la Frontera Norte.
- PTAR (2014). *Diagnóstico elaborado por la Dirección de Saneamiento y Agua Limpia de la Secretaría de Agua y Medio Ambiente del Gobierno del Estado de Zacatecas*. Zacatecas: Dirección de Saneamiento y Agua Limpia de la Secretaría de Agua y Medio Ambiente del Gobierno del Estado de Zacatecas.
- Regalado, A., & Alonzo, A. (23 de julio de 2012). Tratan agua, pero a medias. En: *NTR Periodismo Crítico*. Recuperado de <http://ntrzacatecas.com/2012/06/18/tratan-agua-pero-a-medias/>.

- Rivera, P., & Vázquez, L. B. (2014). Entre crecimiento poblacional y deterioro ambiental: el caso de Zacatecas, Guadalupe y Fresnillo. *Ra Ximhai*, 10(6), 23-43.
- Rivera-Salinas, F. (octubre, 2011). *Inventario y situación actual de las plantas de tratamiento del estado de Zacatecas*. Tesis de maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos. Zacatecas: Unidad Académica de Ingeniería, Universidad Autónoma de Zacatecas.
- Rodríguez, A. (2008). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades*. Tesis de licenciatura. Hermosillo: Universidad de Sonora, Facultad de Ingeniería.
- SAMA (2017). *Plantas de tratamiento hasta el año 2016 en el estado de Zacatecas. Situación actual de operación (inventario)*. Zacatecas: Secretaría de Agua y Medio Ambiente.
- Semarnat (2014). *Normas mexicanas en materia de agua*. México, DF: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de <http://www.semarnat.gob.mx/leyes-y-normas/nom-aguas-residuales>.
- Semarnat (2013). *Programa de Acciones y Proyectos para la Sustentabilidad Hídrica. Visión 2030*. México, DF: Estado de Zacatecas, Gobierno Federal y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

## Dirección institucional de los autores

*Dra. Patricia Rivera*

Profesora investigadora  
Colegio de la Frontera Norte  
Departamento de Economía  
Km. 18.5 carretera escénica Tijuana-Ensenada, San Antonio del Mar  
22560 Tijuana, Baja California, MÉXICO  
Teléfono: +52 (664) 6316 300, ext. 3419  
privera@colef.mx

*Dr. Refugio Chávez*

Lector  
Universidad de Estrasburgo  
1 rue des Vergers, 67380 Lingolsheim, FRANCE  
chavezramirez@unistra.fr

*Mtra. Alma Fabiola Rivera Salinas*

Directora Técnica  
Junta Intermunicipal de Agua Potable y Alcantarillado de Zacatecas (JIAPAZ)  
Circuito Cerro del Gato, edificio F, primer piso, Ciudad Administrativa  
98160 Zacatecas, Zacatecas, MÉXICO  
Teléfono: +52 (492) 4915 055, ext. 34112  
fabiola.rivera@jiapaz.gob.mx



Planta de tratamiento el Orito, Zacatecas, Zacatecas.

Foto: Alma Fabiola Rivera Salinas.

# Quantitative analysis of internal wave detection variability in the Northern Gulf of California using Synthetic Aperture Radar

• Diego Gámez\* • Bernardo Shirasago • Edgar Pérez •  
*Instituto Politécnico Nacional, La Paz, México*  
 \*Correspondence author

DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-09

## Abstract

Gámez, D., Shirasago, D., & Pérez, E. (January-February, 2018). Quantitative analysis of internal wave detection variability in the Northern Gulf of California using Synthetic Aperture Radar. *Water Technology and Sciences* (in Spanish), 9(1), 125-133, DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-09.

The islands Tiburon and Angel de la Guarda are located toward the northern part of the Gulf of California (NGC), these are commonly referred to as the Midriff Island zone. These islands are surrounded by channels and sills, which in interaction with tides propitiate the conditions for strong water column mixing, and together with the topography and stratification produce internal waves (IW). The Synthetic Aperture Radar (SAR) has demonstrated its capacity to detect IW at important oceanic areas. In this study, the seasonal and inter-annual variability of IW was determined for the first time using “quick-look” SAR images (SI) at NGC during the period of 2000-2006.

**Keywords:** Northern Gulf of California, internal waves, Synthetic Aperture Radar, seasonal and interannual variability, midriff islands, sills.

## Resumen

Gámez, D., Shirasago, D., & Pérez, E. (enero-febrero, 2018). Análisis cuantitativo de la variabilidad en la detección de ondas internas en el norte del Golfo de California, usando el radar de apertura sintética. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(1), 125-133, DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-09.

Las islas Ángel de la Guarda y Tiburón se localizan hacia el norte del Golfo de California (NGC), y se les conoce por lo común como las grandes islas. Tales islas están rodeadas de canales y umbrales, que al interactuar con las mareas propician las condiciones para una fuerte mezcla en la columna de agua, y junto con la topografía y estratificación producen ondas internas (IW). El radar de apertura sintética (SAR) ha demostrado su capacidad para detectar IW en zonas oceánicas importantes. En el presente estudio, la variabilidad estacional e interanual de IW fue determinada por primera vez con imágenes SAR (SI) de vista rápida en el NGC durante el periodo 2000-2006.

**Palabras clave:** norte del Golfo de California, ondas internas, radar de apertura sintética, variabilidad estacional e interanual, grandes islas, umbrales.

Received: 22/11/2016

Accepted: 01/09/2017

## Introduction

Internal waves (IW) are a nonsinusoidal, non-linear, more-or-less isolated and often detected waves of complex shapes that frequently occur in the marine environment. The tidal flow over topographic features such as sills and continental shelf slopes in stratified oceans can generate IW of tidal frequency (Prinsenbergh & Rattray, 1975; Baines, 1982). Several authors have noted that

these waves are typically observed during the summer, when trapped in a strong and shallow seasonal thermocline (Apel, Ostrovsky, & Stepanyants, 1995; Apel *et al.*, 1997; Apel, Ostrovsky, Stepanyants, & Lynch, 2006; Chapman, Golenko, Paka, Sabinin, & Vlasenko, 1997; Colosi *et al.*, 2001). These waves have periods of 10 minutes and wavelengths ranging from 100-2000 m.

Internal waves can propagate over several hundred kilometers and transport both mass and

momentum; these are often associated with a change in stratification. Their propagation carries considerable velocity shear that can lead to turbulence and mixing. Mixing often introduces bottom nutrients into the water column, and thereby fertilizes the local region, modifying the marine ecosystem (Apel, 2002; Gaxiola-Castro, Álvarez-Borrego, Nájera-Martínez, & Zirino, 2002).

In 1978, the launch of SEASAT with Synthetic Aperture Radar (SAR) onboard corroborated the capability of this sensor to detect IW. Some decades later, SAR systems of the European Space Agency (ESA), RADARSAT (Canada) and Almaz (URSS) satellites also confirmed the effectiveness of this sensor for detecting IW (Fu & Holt, 1984).

Given that nonlinear IW remain coherent for up to several days, the wave packets that are produced during successive tidal cycles are visible in many SAR images. As the packet propagates away from the generation site, additional waves within a packet are formed as the displaced pycnocline oscillates at the local Brunt-Väisälä period (Jackson, Da Silva, Jeans, Alpers, & Caruso, 2013).

Despite the importance of IW as a generator of productivity in the ocean, very few studies have been performed in the Gulf of California (GC). These surveys have been performed in short periods of time using satellite data and in situ measurements trying to describe its presence and its effects in the marine environment (Fu & Holt, 1984; Gaxiola-Castro *et al.*, 2002; Filonov & Lavín, 2003). The scarcity of studies of this phenomenon is attributable to the high cost of in situ and satellite surveys and the unpredictability of finding or detecting it (dimensions, direction and shape). In this sense, the SAR sensor became a powerful tool in detecting IW but the very low temporal resolution of the sensor (coverage of the same location infrequently) and cost of the images are limitations on its use. Therefore, the goal of our study, the first of its kind in GC, consists of detecting, quantify, determine the number of SAR images needed to detect an IW and finally

describe the seasonal and annual variability of IW, thanks to the support of the European Space Agency (ESA) image database.

## Materials and methods

### Study area

The GC is a marginal sea with high evaporation rates; it is considered to be the most important evaporation basin in the Pacific Ocean (Bray, 1988). This area is extremely interesting from oceanographic and meteorological standpoints given its similarity to other seas such as the Red Sea and the Adriatic Sea (Badan-Dangon, Dorman, Merrifield, & Winant, 1991). The rough dimensions of GC are 150 km wide and 1100 km long; its depth varies from approximately 200 m at its head to 3 600 m at its mouth. Many physical processes such as seasonal winds, upwellings, gyres and tidal mixing continuously occur in GC. Also, GC experiences strong interactions with the Pacific Ocean through its mouth (Badan-Dangon, Koblinsky, & Baumgartner, 1985; Argote, Amador, Lavín, & Hunter, 1995).

The general circulation and seasonal variability of GC results from the forces exerted by the Pacific Ocean through its mouth. These forces include tides, low-frequency movements, and to a lesser extent, surface winds from buoyancy flux (Ripa, 1997; Beier, 1997; Marinone, 2003).

Tides in this basin are produced by the co-oscillation of tides from the Pacific Ocean (Filloux, 1973; Ripa & Velázquez, 1993). The semidiurnal components show amplification in tidal height toward the head of GC such as  $M_2$  component that ranges from 36 cm at the gulf entrance to 150 cm in the upper zone, with a minimum in the central part of the gulf (5 cm). In contrast, the diurnal components are in phase in the entire gulf, and the amplitude increases towards the head by continuity. As a result of the different characteristics of the diurnal and semidiurnal components, the tides in the Gulf become mixed (Lavín & Marinone, 2003).

This study focuses on the Northern GC (NGC), its location is 32°N-110°W and 28°N-

106°W, which is a relatively shallow basin with an average depth of 200 m (figure 1). One of the most important topographic features in this area is the presence of the Midriff Archipelago that includes the largest islands in GC, the Tiburon and Angel de La Guarda. The Ballenas Channel, located between the peninsula and Angel de la Guarda Island, presents a maximum depth of approximately 1600 m; Tiburon Basin, located between Angel de la Guarda and Tiburon Islands, reaches a maximum depth of approximately 500 m; Delfin Basin located to the north of Angel de la Guarda Island, presents a maximum depth of approximately 800 m (Shepard, 1950). The Ballenas Channel is isolated from the central GC by a submarine

ridge, its base reaches a depth of around 450 m (Álvarez-Borrego, 2008). Additionally, there are four sills in this region: San Lorenzo, San Esteban, Delfin, and Ballenas Channel.

The length of GC makes it almost resonant to semidiurnal tidal harmonics (Hendershott & Speranza, 1971; Filloux, 1973). This near-resonance results in large tidal ranges (up to 9 m) and strong tidal currents (up to 1 m/s) in the shallow area at the northern extreme of the Gulf. The presence of sills causes even stronger currents (up to 1.5 m/s), which releases large amounts of turbulent kinetic energy. This energy has a strong impact on the physics and biology of the area. Most of the tidal turbulent kinetic energy that dissipates in the GC is due

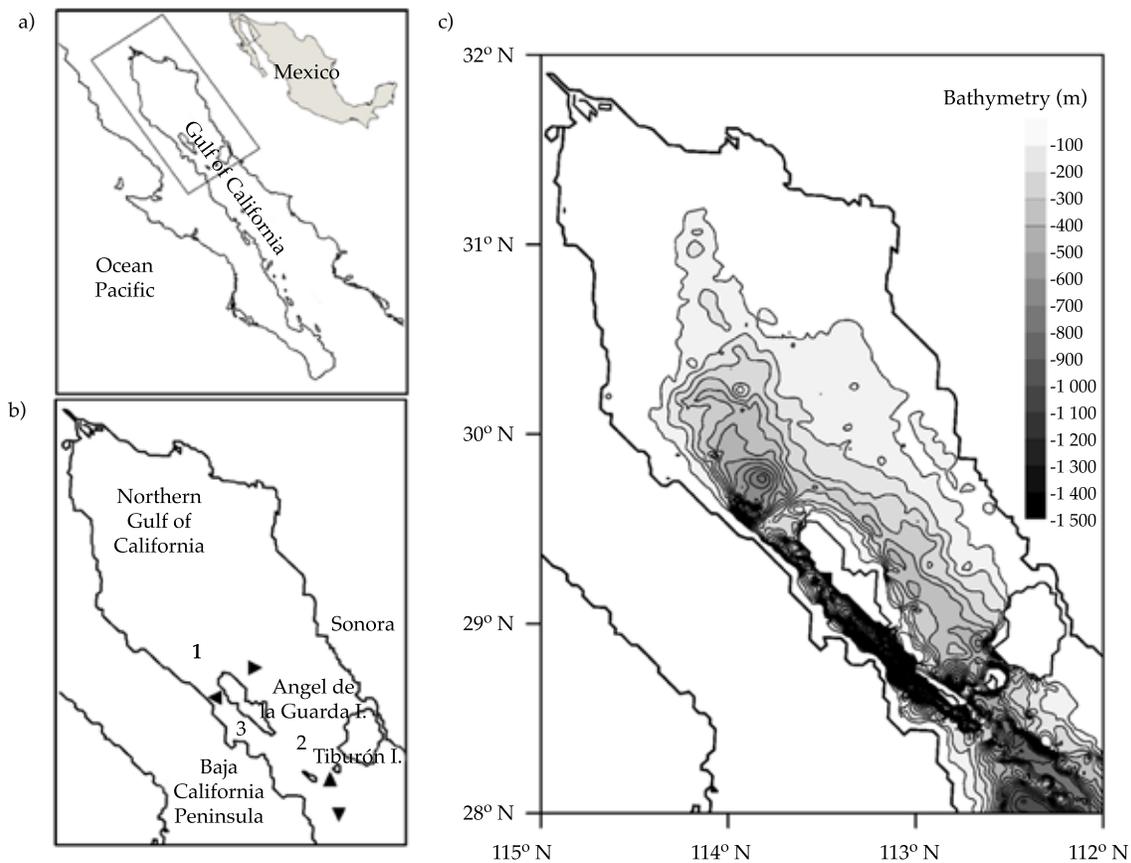


Figure 1. Study area: a) Gulf of California; b) Northern Gulf of California including the Midriff Islands, basins and sills: (1) Delfin Basin, (2) Tiburon Basin, (3) Ballenas Channel, (◆) Ballenas Channel Sill, (▲) San Lorenzo Sill and (▼) San Esteban Sills; c) Northern Gulf of California Bathymetry (m).

to semidiurnal tides (especially M2) and mainly occurs around the islands and in the shallow areas of NGC (Argote *et al.*, 1995; García-Silva & Marinone, 2000; Filonov & Lavín, 2003).

Winds are strong during winter with speeds that reach 8-12 m/s coming from the northwest. These winds cause mixing in the water column, which in the summer is largely stratified since the winds that come from southwest during this season are weak with speeds of less than 5 m/s and calms are frequent (Badan-Dagon *et al.*, 1991; Santamaría-de-Ángel, Álvarez-Borrego, & Müller-Karger, 1994; Marinone, 2007).

### Quantitative analysis

We analyzed 371 images in SAR\_IM\_0P (ERS-2 satellite) and ASA\_IM\_0P formats (ENVISAT satellite) provided by ESA to detect IW (internal waves) and describe their characteristics (direction, train number, wavelength). These are quick glance images with low resolution and are available on the EOLI-sa catalog of the ESA (European Space Agency). Despite lacking high precision, these are very useful for the detection of marine and atmospheric phenomena, in this case IW. Each image includes relevant data or metadata such as the satellite's name, orbit number, track and identification record, satellite pass, acquisition date and time, and geographical location. The scene area varies from 300 to 400 km in azimuth (along-track) with a constant range of 100 km (throughout the track).

SAR data acquired by different satellites lack constant temporal and spatial coverage unlike passive sensor satellites (*e.g.*, AVHRR-NOAA17, MODIS-AQUA/TERRA and SEAWIFS-SEASTAR) and even some active sensor satellites (*e.g.*, NSCATT-ADEOS and SEAWINDS-QUIKSCAT). The acquisition of data depends on the number of scientific projects involved and the temporal scanning periods required. The latter causes the space agency database to be discontinuous in both space and time. Due to the inconsistency of SI acquisition at each sampled month over the period studied (seven years), we calculate the incidence of IW in each analysis made per time scale (monthly, seasonally and interannually).

To deal with this inconsistency we created a method to calculate the number of SI required to detect one image with IW for each time scale analysis. This is because in many SI are not detected IW. We first applied the relative abundance index to estimate the IW number in each time scale. This index is used by many authors such as Lessios (1996), and Lira-Torres and Briones-Salas (2012) when the study object is randomly sampled from an indefinitely large set of objects. In this sense Pielou (1977), Ludwig and Reynolds (1988), Gove, Patil, Swindel and Taillie (1994) describe the relative abundance as the balance descriptor of the population. In this particular case this relative abundance index was used as a descriptor of internal wave generation through time. Afterwards, we calculated the number of SI required to detect one image with IW (SI:IW ratio) where IIW is the number of satellite images with presence of internal waves, using the following equation:

$$N = \frac{1}{\left(\frac{n_{iw}}{n_{si}}\right)}$$

$N$  = SI:IW ratio

$n_{iw}$  = Number of images with IW.

$n_{si}$  = Number of SI obtained for the sampling period.

To calculate the IW relative abundance or denominator fraction in the monthly equation for each of the sampled months, we used the number of SI acquired and the number of IIW; we deleted the months where no IIW were detected. The mean and mode were also determined throughout the study period to obtain reference values.

For the seasonal analysis, we calculated the IW relative abundance using the total of SI acquired and the number of IIW for each season of every year. We obtained the average value for each season during the period of study, the equation was applied for each average value.

Likewise, IW relative abundance of the interannual equation was calculated using the total

number of SI available each year and the IIW detected in each case. The equation was applied to each year.

Data obtained at different time scales were used as reference values for the presence of IW in the study area. Lower values were considered to indicate an increased occurrence of IW in SI; higher values corresponded to a decreased occurrence of IW.

## Results

Time series of sample dates versus the number of images showed the strong variability in the availability of SI acquired by the sensor and the number of SI detecting the presence of IW during the study period (figure 2a). The acquired SI clearly define two periods: April 2000 to June 2003 (where the number of available images ranged from 1-6 with a mean of 2

and a mode of 1) and July 2003 to December 2006 (where the number of available images ranged from 1-18 with a mean of 9 and a mode of 11). Despite differences in the availability of images over these two periods, the number IIW detected during the entire study period did not vary considerably. The first period ranged from 0 to 4 images with a mean of 1 and a mode of 0; the second period ranged from 0 to 5 images with a mean of 2 and a mode of 0. From the sampled months (59), 27 lacked IW detections and 12 (44%) corresponded to winter. In the first period, 70% lacked IIW detections and 31% during the second. These results reveal a dependence of IW detection from SI acquisition, and this dependence is not directly proportional.

The monthly results obtained from the equation (figure 2b) are useful for determining the number of SI required to detect an IIW,

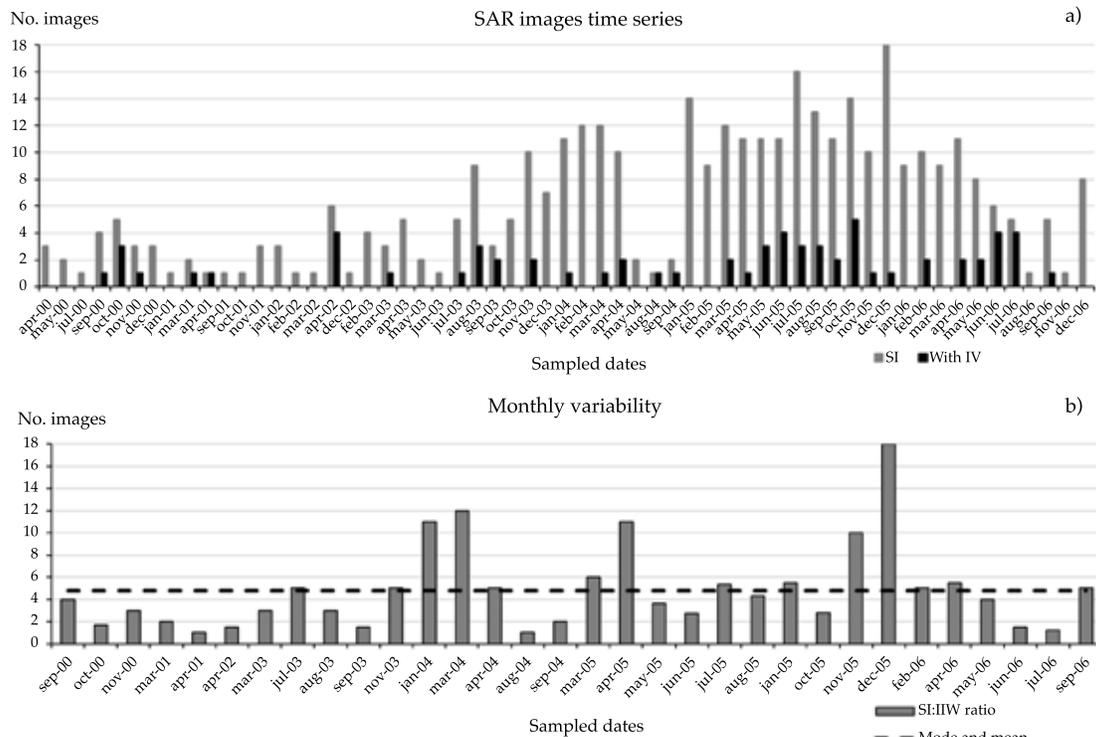


Figure 2. Time series variability from 2000-2006 in the NGC: a) sampled dates with SI (gray bars) and IIW detected (black bars); b) ratio between the number of SI acquired and IIW detected (SI:IIW) (gray bars) and mean and mode (dotted line).

expressed as the ratio SI:IIW. We found that the mean and mode shared the same ratio (5:1) during the entire study period. In December 2005, the mean and mode exhibited the highest ratio (18:1); this month presented the lowest occurrence of IIW. Other months with low IIW occurrences included March 2004 (12:1), January 2004, April 2005 (11:1), and November 2005 (10:1). We found the highest number of occurrences of IIW with a ratio of 1:1 in April 2001, August 2004 and July 2006. We noted that during the period 2000-2003 the ratio remained below the mean and mode, which indicated a high occurrence of IIW. The opposite situation persisted largely during 2004-2006 when ratio was higher than mean and mode, which indicated a lower occurrence of IIW (figure 2b).

Due to the difference in SI availability during the two periods and the large difference in the detection ratio of IIW (figure 2), we conducted a seasonal rate analysis of the study period. The results of this analysis (figure 3a) showed that winter has the lowest occurrence of IIW with an average ratio of 15:1, this is, one IIW was found out of every 15 SI analyzed. In contrast, spring and summer were characterized by a higher occurrence of IIW with an average ratio of 4:1. Autumn data had an average ratio of 8:1.

The interannual analysis revealed large variability in the detection ratio of IIW; 2002 had a ratio of 3:1, this year presented the most IIW. 2004 exhibited a ratio of 8:1, having the lowest number of IIW (figure 3b).

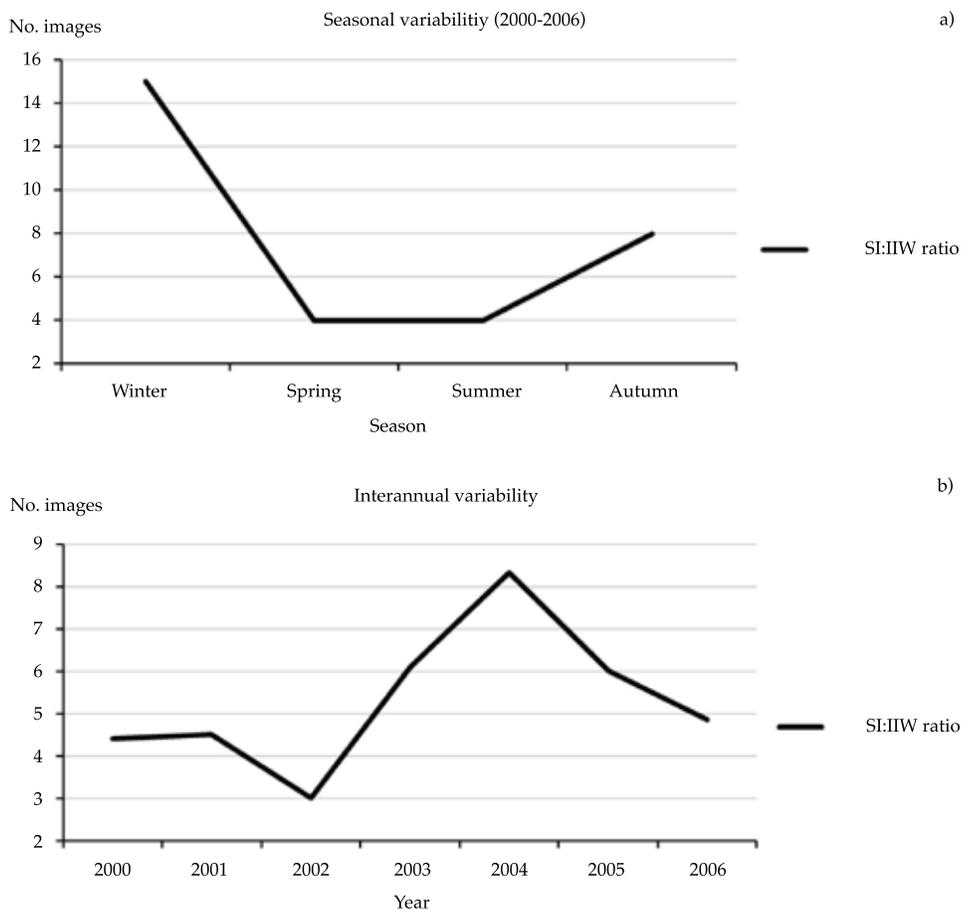


Figure 3. Average ratios of the number of SI acquired and IIW detected (SI:IIW) from 2000-2006 in the NGC: a) seasonal variability; b) interannual variability.

## IW detection in SAR images

### Southern Midriff Island zone

Approximately five wave trains (A-E) were detected in the ASAR image from August 30, 2004 (figure 4). Three of the trains (A, B and D) appear to have been generated in San Lorenzo Sill; the other two trains (C and E) seem to have been generated at San Esteban Sill. All trains exhibited an easterly propagation. Packet A presented the largest wave deformation; D and E showed considerable attenuation.

### Conclusions

We were able to identify the existence of IW in all of the seasons over the study period and

area using SI. Our study is the first to describe temporal IW detection variability in this sea. This study showed that a significant number of IW were sensed at the vicinity of all of the sills at NGC. This finding allowed us to determine the monthly, seasonal and interannual variability of IW detection.

During the time series, the variability observed in the number of SI acquired and the number of IIW detected indicates that the number of images analyzed in each month somehow affects the detection of IW, however this effect is not always proportional. Therefore, the variability in the detection of IW by SI depends on how often this phenomenon occurs in the study area during each month of the year and not on the number of acquired images. This fact suggests that there may be other factors influencing the detection of IW.

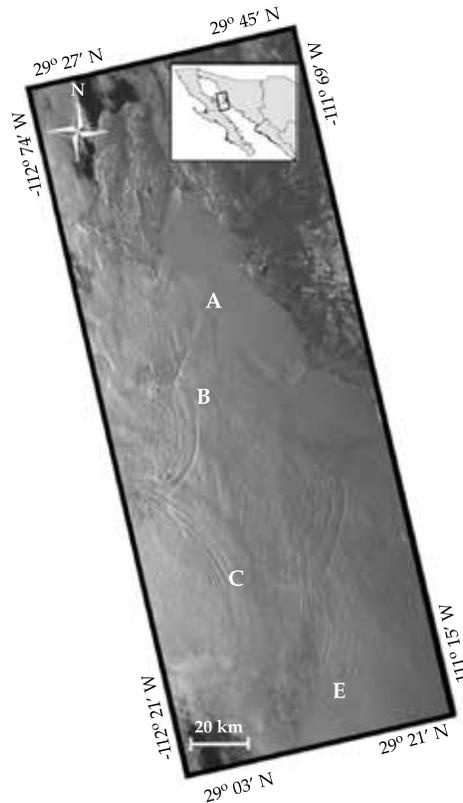


Figure 4. ENVISAT image dated August 30, 2004, of the Southern Midriff Island zone (NGC) showing five trains of IW (A, B, C, D and E) propagating to the east. Orbit 13017, Track 492, ID 63 acquired in ascending pass at 11:19 pm (UTC 05:19 a.m.).

The number of SI in which IW trains were detected about the total of images available allowed us to determine that according to the mode and mean (5;1) calculated in the monthly analysis, 5 SI are the minimum number of images required to detect this type of waves in GC.

Our monthly analysis of SI:IW ratio also demonstrated the existence of periods with higher or lower ratios, hence, periods with lesser or more IW detections. Our proposed analysis circumvents the dependence between the detection of IIW and the number of SI acquired.

The variability found in the monthly analysis confirms that the marine variations occurring throughout the year in the study area determine the generation, and thus the detection of these waves. This fact is clearly observable in the seasonal analysis of SI:IW (figure 4) in which winter data presented the highest value, which means this season was associated with fewer IIW detection than in spring, summer or autumn. Additionally, our results showed that spring and summer were characterized by a high occurrence of IIW.

Our interannual analysis of SI:IW allowed us to determine an important fact: even though the bottom topography of the study area remained unchanged, the IW detection rate varied every year. We observed extreme variations from year to year (e.g., 2004 with a detection ratio of 8:1 (SI:IW) and 2002 with a detection ratio of 3:1). These results indicate that the number of SI required for an IW analysis varies every year.

Finally, as observed in SAR images presented herein, the IW generation occurred in the vicinity of all the sills with different directions, number of waves in each train, size and most cases, with a considerable interference among them, these findings should be consider in further *in situ* studies.

## Acknowledgments

Authors thank the European Space Agency (ESA) for providing the SAR images used in this research. B. Shirasago-Germán is a principal investigator designated by ESA. He is also a fellow

of COFAA and EDI from Instituto Politecnico Nacional. Authors also want to thank American Manuscript Editors for editing this manuscript. Diego Gamez is a recipient of a fellowship from CONACyT and BEIFI- IPN program.

## References

- Álvarez-Borrego S. (2008). Bahía de los Ángeles: recursos naturales y comunidad, línea base 2007 (pp. 45-66). Capítulo 2. En: *Oceanografía*. México DF: Semarnat, INE, Pronatura, San Diego Natural History Museum.
- Apel, J. R. (2002). *Oceanic internal waves and solitons. An atlas of oceanic internal solitary waves*. Global Ocean Associates. Prepared for Office of Naval Research-Code 322.
- Apel, J. R., Badiey, M., Ching-Sang, C., Finette, S., Headrick, R., & Lynch, J. F. (1997). An overview of the 1995 SWARM shallow water internal wave acoustic scattering experiment. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 22(3), 465-500.
- Apel, J. R., Ostrovsky, L. A., & Stepanyants, Y. (1995). *Internal solitons in the ocean. Report MERCIRA0695, Milton S. Eisenhower Research Center, APL* (69 pp.). Baltimore, USA: The Johns Hopkins University.
- Apel, J. R., Ostrovsky, L. A., Stepanyants, Y. A., & Lynch, J. F. (2006). *Internal solitons in the ocean. Report MERCIRA0695, Milton S. Eisenhower Research Center, APL* (69 pp.). Baltimore, USA: The Johns Hopkins University.
- Argote, M. L., Amador, A., Lavín, M. F., & Hunter, J. R. (1995). Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 100(C8), 16103–16118, DOI:10.1029/95JC01500.
- Badan-Dangon, A., Dorman, C. E., Merrifield, M. A., & Winant, C. D. (1991). The lower atmosphere over the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 96(C9), 16877–16896, DOI:10.1029/91JC01433.
- Badan-Dangon, A., Koblinsky, C. J., & Baumgartner, T. (1985). Spring and summer in the Gulf of California: Observations of surface thermal patterns. *Oceanologica Acta*, 8(1), 13-22.
- Baines, P. G. (1982). On internal tide generation models. Deep Sea Research Part A. *Oceanographic Research Papers*, 29(3), 307-338.
- Beier, E. (1997). A numerical investigation of the annual variability in the Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 27(5), 615-632.
- Chapman, R. D., Golenko, N. N., Paka, V. T., Sabinin, K., & Vlasenko, V. I. (1997). Dynamics of Baroclinic Tides on the US Shelf. *Russian Academy of Sciences Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*, 33, 702-714.
- Colosi, J. A., Beardsley, R. C., Lynch, J. F., Gawarkiewicz, G., Ching-Sang, C., & Scotti, A. (2001). Observations of nonlinear internal waves on the outer New England continental shelf during the summer Shelfbreak Primer

- study. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 106(C5), 9587-9601.
- Filloux, J. H. (1973). Tidal patterns and energy balance in the Gulf of California. *Nature*, 243, 217-221.
- Filonov, A. E., & Lavín, M. F. (2003). Internal tides in the northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research Coastal* (1978-2012), 108(C5), 3151-X.
- Fu, L. L., & Holt, B. (1984). Internal waves in the Gulf of California: Observations from a spaceborne radar. *Journal of Geophysical Research Coastal* (1978-2012), 89(C2), 2053-2060.
- García-Silva, G., & Marinone, S.G. (2000). Caracterización dinámica y energética de la marea en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 26(2), 323-353.
- Gaxiola-Castro, G., Álvarez-Borrego, S., Nájera-Martínez, S., & Zirino, A. R. (2002). Internal waves effect on the Gulf of California phytoplankton. *Ciencias Marinas*, 28(3), 297-309.
- Gove, J. H., Patil, G. P., Swindel, B. F., & Taillie, C. (1994). 12 ecological diversity and forest management. *Handbook of Statistics*, 12, 409-462, [https://doi.org/10.1016/S0169-7161\(05\)80014-8](https://doi.org/10.1016/S0169-7161(05)80014-8).
- Hendershott, M. C., & Speranza, A. (1971). Co-oscillating in long, narrow bays; the Taylor problem revisited. *Deep-Sea Research*, 18(10), 959-980, [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(71\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0011-7471(71)90002-7).
- Jackson, C. R., Da Silva, J. C., Jeans, G., Alpers, W., & Caruso, M. J. (2013). Nonlinear internal waves in synthetic aperture radar imagery. *Oceanography*, 26(2), 68-79.
- Lavín, M. F., & Marinone, S. G. (2003). An overview of the physical oceanography of the Gulf of California (pp. 173-204). En: *Nonlinear process in geophysical fluid dynamics*. Velasco Fuentes, O. U., Sheinbaum, J., & Ochoa, J. (eds.). Netherlands: Kluwer Academic Publishers, [https://doi.org/10.1007/978-94-010-0074-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0074-1_11).
- Lessios, H. A. (1996). Methods for quantifying abundance of marine organisms (149-157 pp.). In: *The Diving for Science...1996, "Methods and Techniques of Underwater Research"*. Lang, C. B. (ed.). *Proceedings of the American Academy of Underwater Sciences*. Sixteenth Annual Scientific Diving Symposium, Smithsonian Institution, Washington, DC.
- Lira-Torres, I., & Briones-Salas, M. (2012). Abundancia relativa y patrones de actividad de los mamíferos de los Chimalapas, Oaxaca, México. *Acta Zoológica Mexicana*, 28(3), 566-585.
- Ludwig, J. A., & Reynolds, J. F. (1988). *Statistical ecology: A primer in methods and computing*. Vol. 1. New York: John Wiley & Sons.
- Marinone, S. G. (2003). A three-dimensional model of the mean and seasonal circulation of the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research Coastal*, 108(C10), 3325, <https://doi.org/10.1029/2002JC001720>.
- Marinone, S. G. (2007). A note on "Why does the Ballenas Channel have the coldest SST in the Gulf of California". *Geophysical Research Letters*, 34, L02607, <http://dx.doi.org/10.1029/2006GL028589>.
- Pielou, E. C. (1977). *Mathematical ecology* (385 pp.). New York: John Wiley & Sons.
- Prinsenber, S. J., & Rattray, M. (1975). Effects of continental slope and variable Brunt-Väisälä frequency on the coastal generation of internal tides. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 22(4), 251-263.
- Ripa, P. (1997). Towards a physical explanation of the seasonal dynamics and thermodynamics of the Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 27, 597-614.
- Ripa, P., & Velázquez, G. (1993). Modelo unidimensional de la marea en el Golfo de California. *Geofísica Internacional*, 32(1), 41-56.
- Santamaría-del-Ángel, E., Álvarez-Borrego, S., & Müller-Karger, F. E. (1994). Gulf of California Biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of General Virology*, 99(C4), 7411-7421.
- Shepard, F. P. (1950). EW Scripps cruise to the Gulf of California. Part III: Submarine topography of the Gulf of California. *Geological Society of America Memoirs*, 43, 1-30.

## Institutional address of the authors

M.C. Diego Gómez  
Dr. Bernardo Shirasago  
Dr. Edgar Pérez

Instituto Politécnico Nacional  
Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas  
Av. IPN s/n,  
23090 La Paz, Baja California Sur, México  
Tel.: +52 (612) 1225 322  
gmzstodiego@gmail.com  
bshirasago@ipn.mx  
elplmam@gmail.com



Canal del Trasvase Tajo-Segura, España.

Foto: José Luis García Aróstegui.

# Detección de sequías meteorológicas anuales en el estado de Zacatecas, México, con base en índices de anomalía estandarizada

• Daniel Francisco Campos-Aranda •  
*Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México*

\*Autor de correspondencia

DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-10

## Resumen

Campos-Aranda, D. F. (enero-febrero, 2018). Detección de sequías meteorológicas anuales en el estado de Zacatecas, México, con base en índices de anomalía estandarizada. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(1), 135-149, DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-10.

Las sequías meteorológicas (SM) son un decremento temporal en la precipitación normal que recibe una localidad o región. Para formular planes de mitigación de sus daños, es necesario estudiarlas para estimar sus características. En este trabajo se detecta la ocurrencia de las SM anuales y se estima su severidad a través del índice de sequías de Pedj (ISP), que se define como la diferencia entre las anomalías estandarizadas de la temperatura media y de la precipitación, ambas anuales. Se calcularon 16 series del ISP, en el estado de Zacatecas, México, cuyo periodo común fue de 65 años en el lapso de 1950 a 2014. Después de verificar su homogeneidad, tales series se analizaron con varios métodos estadísticos, para establecer su comportamiento local y regional. A nivel local se detectan y analizan las secuencias más severas de cinco años, así como las diez sequías más extremas. El análisis regional buscó los años con sequía que afectaron un mayor número de estaciones climatológicas, en cada una de las tres zonas geográficas analizadas. Como el ISP data de mediados de los años setenta, se contrastó con un índice reciente, el  $RDI_{ST}$ . De todos los análisis realizados se concluye que el ISP es una técnica simple que permite la detección precisa a nivel local y regional de las SM anuales; por ello se recomienda su aplicación sistemática. Además, permitirá verificar los resultados de otros índices de sequías y hará posible conocer las SM como serie cronológica, orientado esto último a su pronóstico.

**Palabras clave:** desviación estándar, índice de anomalía estandarizada, índice de sequías de Pedj, pruebas estadísticas, promedios móviles, sequías importantes.

## Abstract

Campos-Aranda, D. F. (January-February, 2018). Detection of annual meteorological droughts in the state of Zacatecas, Mexico, based on standardized anomaly indices. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 9(1), 135-149, DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-10.

Meteorological droughts (MD) are a temporary decrease in the normal rainfall received by a location or a region. In order to formulate plans for mitigation of damages, it becomes necessary to study the droughts to estimate related features. In this work the occurrence of annual MD is detected and its severity is estimated through the Pedj drought index (PDI), defined as the difference between the standardized anomalies of the mean temperature and of precipitation, both annual estimates. Sixteen PDI series were calculated, in the state of Zacatecas, Mexico, whose common period was 65 years in the lapse from 1950 to 2014. After verifying their homogeneity, such series were analyzed with various statistical methods, to establish their local and regional behavior. At the local level the most severe sequences of five years are detected and analyzed, as well as the ten most extreme droughts. The regional analysis helped finding the drought years that affected a large number of climatological stations, in each of the three geographical areas analyzed. As the PDI dates from mid-seventies was contrasted with a recent index, the  $RDI_{ST}$ . Based on all analyzes, it is concluded that the PDI is a simple technique that allows the accurate detection at local and regional level of annual MD; therefore its systematic application is recommended. This implementation will allow the verification of results of other indices of drought and make it possible to know the MD as time series, the latter oriented to forecasting.

**Keywords:** Standard deviation, standardized anomaly index, Pedj drought index, statistical tests, moving averages, major droughts.

Recibido: 12/10/2015  
 Aceptado: 09/01/2017

## Introducción

Los fenómenos anormales y extremos del tiempo atmosférico y del clima de un lugar, como son las crecientes y sequías, así como sus particularidades asociadas, tormentas y ondas de calor, por lo general tienen efectos perjudiciales en la sociedad y su infraestructura, en los ecosistemas y vida silvestre (Kunkel, Pielke, & Changnon, 1999).

Respecto a las *sequías*, una definición general establece que es un *decremento en la disponibilidad de agua*, la cual está caracterizada por tres aspectos cruciales: duración, severidad y área abarcada. Este concepto de sequía involucra dos tipos de evaluadores de la *deficiencia de agua*, el primero asociado con los efectos directos de los elementos del ciclo hidrológico, como precipitación, temperatura, evapotranspiración, escurrimiento en ríos, etc.; el segundo son los indicadores de los recursos hídricos, los cuales estiman la severidad en términos de los impactos en los usos del agua, como abastecimiento urbano, industrial, agrícola y ecológico (Mawdsley, Petts, & Walker, 1994).

Por otra parte, los *índices de sequías*, por lo común pueden reflejar las condiciones de sequía con base en las variables hidroclimáticas, pero no son capaces de cuantificar los daños económicos. Sin embargo, los índices que cuantifican la variabilidad climática son útiles para detección de sequías, su seguimiento y estimación indirecta de sus impactos, todo lo cual permite elaborar planes de prevención y contingencia contra tales eventos (Mishra & Singh, 2010; Lobato-Sánchez, 2016).

El objetivo de este estudio consiste en describir con detalle el *índice de sequías de Pedj (ISP)*, el cual se define por la diferencia entre las anomalías estandarizadas de la temperatura media y de la precipitación, ambas anuales. Para 16 estaciones climatológicas del estado de Zacatecas, México, se procesaron sus registros comunes de 65 años en el periodo de 1950 a 2014, para obtener sus series del *ISP*, las cuales se analizaron estadísticamente, a fin de verificar su homogeneidad y obtener las características

fundamentales de las sequías anuales en el ámbito local y en las tres zonas geográficas del estado.

## Métodos y materiales

### Índices de monitoreo de la variabilidad climática

Las mediciones de precipitación y temperatura son las más abundantes tanto temporal como espacialmente, por ello estos datos han sido utilizados de forma individual o conjunta para caracterizar el clima de una región o territorio. Además, la correlación, usualmente negativa, entre temperatura y precipitación ha sido verificada por diversos autores; es decir, que periodos secos son por lo general lapsos calurosos y viceversa. Por otra parte, la variabilidad anual de los registros o series de precipitación y temperatura media se puede detectar a través de sus *índices de anomalía estandarizada (IAE)*, definidos (Elagib & Elhag, 2011) como:

$$IAE_{PA} = \frac{PA - PMA}{DEP} \quad (1)$$

y:

$$IAE_{TM} = \frac{TM - TMA}{DET} \quad (2)$$

siendo *PA* la precipitación anual en milímetros; *PMA*, su valor medio, y *DEP* su desviación estándar no sesgada; se estima con la ecuación (3). *TM* es el valor anual de la temperatura media en °C; *TMA*, su valor promedio y *DET* es su desviación estándar no sesgada; se evalúa con la ecuación (4):

$$DEP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (PA_i - PMA)^2}{(n-1)}} \quad (3)$$

$$DET = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (TM_i - TMA)^2}{(n-1)}} \quad (4)$$

en las expresiones anteriores,  $n$  es el número de años del registro o serie procesada.

### Índice para detección de sequías

Pedj propuso en 1975, en Rusia, un índice para detección de sequías anuales, definido por la diferencia entre los  $IAE$  de la temperatura media menos el de la precipitación (Elagib & Elhag, 2011), esto es:

$$ISP = IAE_{TM} - IAE_{PA} \quad (5)$$

$ISP$  es el *Índice de Sequías de Pedj*, cuyo valor anual clasifica al tiempo atmosférico como húmedo o de sequía según el cuadro 1. Elagib y Elhag (2011) verificaron empíricamente la ecuación (5), encontrando que el  $ISP$  tiene correlación negativa con la anomalía de la precipitación y varía de modo directo con la anomalía de la temperatura media; lo más importante es que captura ambas direcciones o tendencias. Este índice ha sido utilizado por varios autores en trabajos de caracterización territorial alrededor del mundo, como Gruza, Rankova, Razuvaev y Bulygina (1999), Qian y Zhu (2001), y Potop y Soukup (2009).

### Índice de reconocimiento de sequías

Designado RDI de *Reconnaissance Drought Index* es quizás el índice más simple que se ha propuesto de manera reciente (Tsakiris & Vangelis, 2005; Tsakiris, Tigkas, Vangelis, & Pangalou, 2007; Campos-Aranda, 2014). Se calcula inicialmente como el cociente ( $a_i$ ) entre la precipitación mensual acumulada y la respectiva evapotranspiración potencial ( $ETP$ ), en los

$k$  meses considerados como *duración de la sequía* de cada año  $i$  del registro procesado. Cuando  $k = 12$  en el lapso de enero a diciembre, el RDI es un índice anual, esto es:

$$a_i = \frac{PA_i}{ETP_i} \quad (6)$$

Ya que las magnitudes de  $a_i$  pueden ser representadas probabilísticamente por la distribución log-normal, los valores estandarizados del RDI se obtienen fácilmente con la ecuación:

$$RDI_{st}^i = \frac{y_i - \bar{y}}{\sigma_y} \quad (7)$$

en la cual:

$$y_i = \ln(a_i) \quad (8)$$

En la ecuación (7),  $\bar{y}$  es la media aritmética y  $\sigma_y$  es la desviación estándar de los valores  $y_i$ . Los valores positivos del  $RDI_{st}$  indican años húmedos y los negativos son *sequías anuales*, con la severidad siguiente: leves hasta -1.00; moderadas, fluctuando de -1.00 a -1.50; severas, variando de -1.50 a -2.00; y por último, extremas, menores que -2.00.

Para estimar la evapotranspiración potencial anual ( $ETP_i$ ) en milímetros de la ecuación (6) se puede utilizar el método de Hargreaves-Samani, que está basado exclusivamente en la temperatura media ( $TM_i$ ) anual expresada en grados Fahrenheit y en la radiación solar incidente media diaria ( $Rs_i^l$ ) anual expresada en milímetros de lámina de agua evaporada ( $l$ ). Su fórmula es (Hargreaves & Samani, 1982; Campos-Aranda, 2005):

$$ETP_i = 2.7375 \cdot Rs_i^l \cdot (1.8 \cdot TM_i + 32) \quad (9)$$

Cuadro 1. Clasificación de los años como húmedos o de sequía, según el valor del  $ISP$  (Potop & Soukup, 2009; Elagib & Elhag, 2011).

Intervalo del $ISP$	Tipo o categoría	Abreviatura	Intervalo del $ISP$	Tipo o categoría	Abreviatura
$-1 \leq ISP < 0$	Húmedo leve	HL	$0 < ISP < 1$	Sequía leve	SL
$-2 \leq ISP < -1$	Húmedo moderado	HM	$1 \leq ISP < 2$	Sequía moderada	SM
$-3 \leq ISP < -2$	Húmedo severo	HS	$2 \leq ISP < 3$	Sequía severa	SS
$ISP < -3$	Húmedo extremo	HE	$ISP \geq 3$	Sequía extrema	SE

La radiación solar incidente ( $R_s$ ) promedio se obtuvo del mapa anual para la república mexicana expuesto por Almanza y López (1975), cuyo valor para la ciudad de Zacatecas es de  $495 \text{ cal/cm}^2/\text{d}$ . Para la transformación de  $R_s$  a lámina de agua evaporada por día se emplea la fórmula siguiente:

$$R_{s_i}^l = \frac{10 \cdot R_{s_i}}{Hv_i} \quad (10)$$

en la cual  $Hv_i$  es el llamado calor latente de evaporación o energía necesaria en calorías para evaporar 1 g o un  $\text{cm}^3$  de agua; se estima con la expresión siguiente, estando la temperatura media ( $TM_i$ ) anual en  $^{\circ}\text{C}$ :

$$Hv_i = 595.9 - 0.55 \cdot TM_i \quad (11)$$

### Registros climáticos anuales utilizados

En el estudio realizado por Campos-Aranda (2015) a la precipitación anual del estado de Zacatecas, México, se observó que 16 estaciones

pluviométricas podían seleccionarse con un periodo común máximo de 63 años, en el lapso de 1950 a 2012. Tales datos fueron ampliados hasta el año de 2014, con base en la información proporcionada por la Dirección Local Zacatecas de la Comisión Nacional del Agua (Conagua). Siguiendo un procedimiento idéntico al descrito para la precipitación en la referencia citada, se integraron los 16 registros anuales correspondientes de temperatura media en el periodo común de 65 años (1950-2014). Las características generales de estas 16 estaciones climatológicas que serán procesadas se citan en el cuadro 2, expuestas por zonas geográficas y en orden progresivo de PMA. En la figura 1 se muestra su ubicación dentro del estado de Zacatecas.

### Resultados y discusión

#### Cálculo de las series del índice de sequías de Pedj

Aplicando las ecuaciones (1) a (5) en los 16 registros anuales que serán procesados de

Cuadro 2. Datos generales de las 16 estaciones climatológicas procesadas del estado de Zacatecas, México.

Núm.	Nombre estación (núm. del AC <sup>1</sup> )	Latitud N	Long. WG	Altitud ( <sup>2</sup> )	RH <sup>3</sup>	Zona	PMA (mm)	DEP (mm)	TMA ( $^{\circ}\text{C}$ )	DET ( $^{\circ}\text{C}$ )	ISP <sup>4</sup>	
											Mín	Máx
1	Cañitas de Felipe Pescador (9)	23° 36'	102° 44'	2025	37	Norte	371.3	132.52	16.02	1.057	-3.415	3.460
2	Río Grande (73)	23° 48'	103° 02'	1890	36	Norte	384.7	128.36	16.92	0.481	-3.452	3.845
3	Fresnillo (30)	23° 11'	102° 53'	2195	37	Norte	415.9	125.59	16.91	1.136	-4.309	4.003
4	Leobardo Reynoso (25)	23° 11'	103° 12'	2090	36	Norte	418.3	121.79	16.08	0.471	-4.433	2.648
5	Villa de Cos (98)	23° 17'	102° 21'	2050	37	Norte	426.4	165.01	17.51	0.658	-5.111	4.331
6	Santa Rosa (69)	22° 56'	103° 07'	2240	36	Norte	459.3	149.28	14.75	0.545	-3.981	2.730
7	San Pedro Piedra Gorda (83)	22° 27'	102° 21'	2032	12	Centro	411.5	135.24	16.85	0.828	-3.611	2.793
8	Villa García (99)	22° 10'	101° 57'	2102	12	Centro	443.3	126.41	16.33	0.813	-3.235	2.634
9	Pinos (65)	22° 17'	101° 35'	2408	37	Centro	448.3	151.37	16.29	1.026	-4.107	3.503
10	Zacatecas (103)	22° 46'	102° 35'	2485	37	Centro	463.2	133.21	15.70	0.598	-3.280	3.084
11	Villanueva (102)	22° 22'	102° 53'	1920	12	Centro	470.9	145.91	16.89	0.575	-3.048	3.230
12	Presa El Chique (68)	22° 00'	102° 53'	1620	12	Sur	543.6	117.21	20.92	0.884	-3.259	3.873
13	Juchipila (42)	21° 23'	103° 07'	1270	12	Sur	691.7	143.39	21.72	1.483	-3.297	3.242
14	Nochistlán (58)	21° 22'	102° 51'	1850	12	Sur	700.2	162.05	18.61	0.721	-4.527	3.412
15	Tlaltenango (94)	21° 47'	103° 18'	1700	12	Sur	701.5	157.22	18.05	1.176	-4.411	2.615
16	Excámé (27)	21° 39'	103° 20'	1740	12	Sur	736.5	154.47	18.53	0.493	-3.662	3.330

<sup>1</sup> Archivo de Conagua; <sup>2</sup> metros sobre el nivel del mar; <sup>3</sup> región hidrológica; <sup>4</sup> índice de sequías de Pedj.

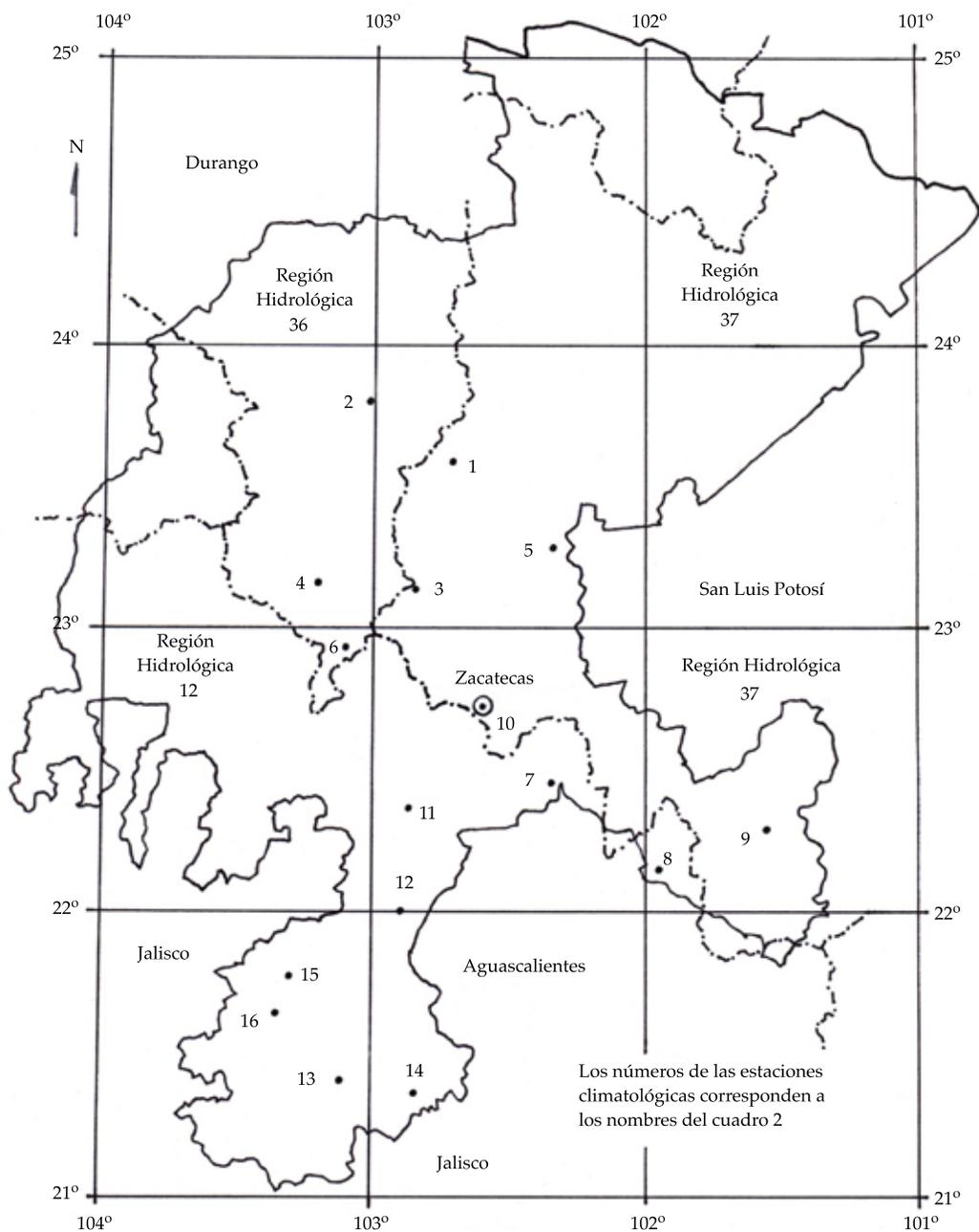


Figura 1. Localización geográfica de las 16 estaciones climatológicas procesadas del estado de Zacatecas, México.

precipitación y temperatura media se obtienen las series del *índice de sequías de Pedj (ISP)*, cuyos valores extremos se citan en el cuadro 2. En el cuadro 3 se exponen los datos y resultados anuales para cada una de las estaciones climatológicas consideradas representativas de las tres

zonas geográficas definidas, las cuales fueron Leobardo Reynoso, Zacatecas y Nochistlán; la primera y la última tienen registros homogéneos, según resultados del cuadro 4 del inciso siguiente, y Zacatecas sólo tiene persistencia, es la capital del estado.

Cuadro 3. Datos y cálculos anuales de sequías con base en el *ISP* en las tres estaciones climatológicas indicadas del estado de Zacatecas, México.

Valores de		Leobardo Reynoso (El Sauz)				Zacatecas				Nochistlán			
<i>PMA</i>	<i>DEP</i>	418.334 mm		121.793 mm		463.220 mm		133.206 mm		700.160 mm		162.052 mm	
<i>TMA</i>	<i>DET</i>	16.083 °C		0.471 °C		15.703 °C		0.598 °C		18.608 °C		0.721 °C	
Núm.	Año	<i>PA</i>	<i>TM</i>	<i>ISP</i>	<i>TS</i>	<i>PA</i>	<i>TM</i>	<i>ISP</i>	<i>TS</i>	<i>PA</i>	<i>TM</i>	<i>ISP</i>	<i>TS</i>
1	1950	397.3	16.7	1.484	SM	396.7	16.6	1.998	SM	654.9	18.9	0.684	SL
2	1951	431.6	16.7	1.202	SM	437.6	16.3	1.190	SM	616.5	17.9	-0.465	-
3	1952	305.9	16.7	2.234	SS	364.8	15.9	1.068	SM	379.6	17.0	-0.250	-
4	1953	453.2	15.7	-1.100	-	441.7	15.6	-0.011	-	609.5	17.1	-1.531	-
5	1954	292.4	16.5	1.920	SM	284.2	16.2	2.174	SS	762.5	19.3	0.575	SL
6	1955	467.6	16.0	-0.581	-	584.7	15.8	-0.750	-	880.9	19.3	-0.156	-
7	1956	281.2	15.8	0.524	SL	389.7	16.0	1.048	SM	730.8	18.5	-0.338	-
8	1957	278.3	16.2	1.398	SM	252.1	16.6	3.084	SE	530.5	19.0	1.591	SM
9	1958	807.3	15.5	-4.433	-	682.7	15.7	-1.653	-	977.9	17.7	-2.972	-
10	1959	595.5	15.7	-2.269	-	481.5	15.9	0.192	SL	509.0	20.1	3.248	SE
11	1960	306.9	16.2	1.163	SM	321.8	16.4	2.226	SS	480.8	19.0	1.897	SM
12	1961	412.8	16.2	0.294	SL	334.7	16.5	2.297	SS	850.6	19.0	-0.385	-
13	1962	310.4	16.6	1.985	SM	309.4	16.8	2.988	SS	697.6	19.1	0.698	SL
14	1963	434.2	16.8	1.393	SM	326.3	16.5	2.360	SS	1001.3	18.4	-2.146	-
15	1964	470.3	16.3	0.034	SL	447.7	15.7	0.111	SL	739.7	18.1	-0.948	-
16	1965	435.3	15.9	-0.528	-	510.9	15.6	-0.530	-	784.4	18.4	-0.808	-
17	1966	478.8	15.9	-0.886	-	514.3	15.3	-1.057	-	739.7	18.3	-0.671	-
18	1967	455.2	16.0	-0.479	-	590.9	15.7	-0.964	-	1049.0	19.0	-1.609	-
19	1968	463.0	15.3	-2.031	-	635.1	14.7	-2.967	-	681.7	18.4	-0.174	-
20	1969	241.9	16.5	2.335	SS	169.3	15.2	1.366	SM	550.2	19.1	1.608	SM
21	1970	524.7	15.7	-1.687	-	549.4	15.2	-1.488	-	811.7	19.2	0.133	SL
22	1971	508.1	16.1	-0.701	-	764.3	15.5	-2.600	-	856.8	18.8	-0.700	-
23	1972	344.4	16.5	1.493	SM	414.4	15.9	0.696	SL	712.4	19.6	1.300	SM
24	1973	762.9	15.4	-4.281	-	521.7	15.5	-0.778	-	888.0	19.0	-0.615	-
25	1974	286.9	16.0	0.903	SL	415.9	15.6	0.183	SL	723.2	19.0	0.402	SL
26	1975	412.0	15.4	-1.400	-	367.6	15.5	0.378	SL	643.9	18.6	0.337	SL
27	1976	565.9	15.0	-3.513	-	570.0	14.8	-2.311	-	808.5	18.5	-0.818	-
28	1977	314.0	15.7	0.043	SL	405.7	15.4	-0.075	-	799.7	18.7	-0.486	-
29	1978	285.3	16.2	1.341	SM	278.3	15.4	0.882	SL	696.7	19.1	0.704	SL
30	1979	294.4	15.9	0.629	SL	300.1	15.6	1.052	SM	541.2	19.1	1.663	SM
31	1980	418.4	16.5	0.885	SL	377.0	15.6	0.475	SL	780.1	19.6	0.882	SL
32	1981	429.6	16.5	0.794	SL	588.5	15.4	-1.447	-	694.7	19.0	0.578	SL
33	1982	286.2	16.8	2.608	SS	299.6	16.3	2.226	SS	723.1	19.5	1.095	SM
34	1983	394.6	15.8	-0.407	-	533.0	14.9	-1.866	-	827.1	18.5	-0.933	-
35	1984	565.1	16.6	-0.107	-	560.1	15.4	-1.234	-	773.7	19.0	0.090	SL
36	1985	498.7	16.7	0.651	SL	542.0	14.2	-3.103	-	797.1	19.2	0.223	SL
37	1986	481.1	16.3	-0.054	-	511.3	14.8	-1.870	-	677.7	19.4	1.237	SM
38	1987	565.5	16.1	-1.172	-	632.6	14.6	-3.115	-	684.6	19.0	0.640	SL
39	1988	502.5	16.1	-0.655	-	489.7	14.9	-1.541	-	639.4	17.9	-0.606	-

Cuadro 3 (continuación). Datos y cálculos anuales de sequías con base en el *ISP* en las tres estaciones climatológicas indicadas del estado de Zacatecas, México.

Valores de		Leobardo Reynoso (El Sauz)				Zacatecas				Nochistlán			
<i>PMA</i>	<i>DEP</i>	418.334 mm		121.793 mm		463.220 mm		133.206 mm		700.160 mm		162.052 mm	
<i>TMA</i>	<i>DET</i>	16.083 °C		0.471 °C		15.703 °C		0.598 °C		18.608 °C		0.721 °C	
Núm.	Año	<i>PA</i>	<i>TM</i>	<i>ISP</i>	<i>TS</i>	<i>PA</i>	<i>TM</i>	<i>ISP</i>	<i>TS</i>	<i>PA</i>	<i>TM</i>	<i>ISP</i>	<i>TS</i>
40	1989	371.6	16.7	1.695	SM	412.8	15.3	-0.295	-	336.0	19.0	2.791	SS
41	1990	507.3	17.0	1.218	SM	721.4	14.9	-3.280	-	901.4	19.0	-0.698	-
42	1991	494.5	16.3	-0.164	-	669.6	15.2	-2.390	-	797.4	17.6	-1.997	-
43	1992	413.7	15.8	-0.564	-	537.1	14.9	-1.897	-	1117.5	17.2	-4.527	-
44	1993	347.2	16.6	1.683	SM	468.3	15.5	-0.377	-	704.8	17.7	-1.287	-
45	1994	333.1	17.0	2.648	SS	554.1	16.1	-0.019	-	579.0	18.3	0.321	SL
46	1995	380.3	16.5	1.198	SM	342.8	15.9	1.233	SM	806.0	18.0	-1.496	-
47	1996	446.4	15.9	-0.619	-	568.8	15.6	-0.965	-	571.4	17.6	-0.602	-
48	1997	310.0	15.5	-0.350	-	354.0	14.9	-0.522	-	810.6	19.0	-0.138	-
49	1998	299.4	16.6	2.075	SS	473.0	16.6	1.425	SM	497.3	19.0	1.796	SM
50	1999	250.2	15.8	0.779	SL	343.5	16.0	1.395	SM	415.1	17.7	0.501	SL
51	2000	306.4	16.0	0.743	SL	339.0	16.1	1.596	SM	532.3	16.8	-1.470	-
52	2001	285.8	15.6	0.062	SL	481.9	15.5	-0.480	-	409.0	17.6	0.400	SL
53	2002	537.7	16.2	-0.732	-	693.3	15.7	-1.732	-	868.1	17.5	-2.572	-
54	2003	475.3	16.0	-0.644	-	559.9	15.7	-0.731	-	769.4	18.4	-0.715	-
55	2004	540.9	15.5	-2.245	-	718.3	15.9	-1.586	-	904.9	19.0	-0.720	-
56	2005	380.0	16.3	0.776	SL	358.7	16.7	2.451	SS	415.1	19.8	3.412	SE
57	2006	442.7	15.9	-0.589	-	520.3	16.8	1.404	SM	634.8	19.0	0.947	SL
58	2007	399.2	15.6	-0.869	-	408.8	16.2	1.239	SM	742.6	18.6	-0.273	-
59	2008	643.3	15.3	-3.511	-	591.3	15.7	-0.967	-	705.0	19.0	0.514	SL
60	2009	386.5	16.0	0.085	SL	502.9	16.4	0.867	SL	524.4	19.1	1.767	SM
61	2010	346.9	15.1	-1.503	-	493.0	15.5	-0.563	-	575.4	17.9	-0.211	-
62	2011	183.5	16.2	2.177	SS	245.5	15.6	1.462	SM	493.9	19.1	1.955	SM
63	2012	301.2	16.0	0.785	SL	216.0	15.3	1.182	SM	675.0	19.0	0.699	SL
64	2013	640.2	15.9	-2.211	-	487.6	16.8	1.650	SM	695.2	18.7	0.159	SL
65	2014	409.0	15.6	-0.950	-	450.1	16.4	1.263	SM	722.1	17.6	-1.532	-
Sumas		-	-	-	34	-	-	-	32	-	-	-	32

Simbología:

*PMA* precipitación media anual en milímetros.*DEP* desviación estándar de la precipitación en milímetros.*TMA* temperatura media promedio anual en °C.*DET* desviación estándar de la *TM* en milímetros.*PA* precipitación anual en milímetros.*TM* temperatura media del año en °C.*ISP* índice de sequías de Pedj adimensional.*TS* tipo de sequía (SL, leve; SM, moderada; SS, severa; SE, extrema).

En la figura 2 se muestra la serie cronológica del *ISP* anual de la estación climatológica Cañitas de Felipe Pescador en barras y su curva de promedios móviles de orden 5. Esta estación resultó no homogénea según las pruebas básicas; tiene persistencia y tendencia lineal ascendente,

con pendiente estadísticamente diferente de cero según prueba de la *t* de Student (Campos-Aranda, 2015), ya que  $t = 2.462$  y  $t_c = 1.998$ . En la figura 3 se expone la serie cronológica del *ISP* anual de la estación Nochistlán, que resultó homogénea.

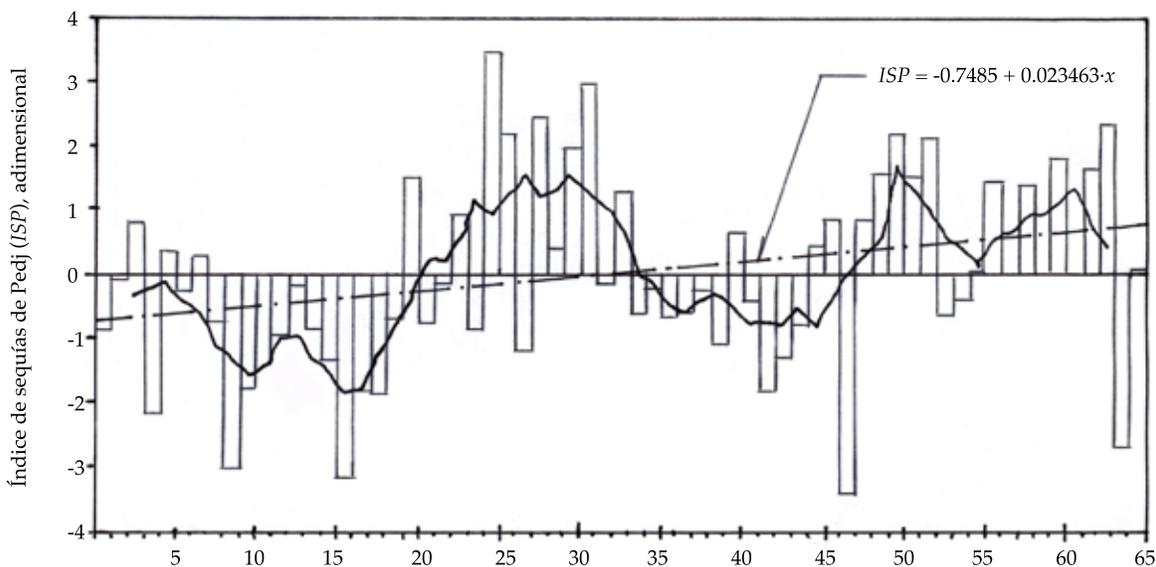


Figura 2. Serie cronológica del índice de sequías de Pedj (ISP) en barras, curva de promedios móviles de orden 5 y recta de tendencia en la estación climatológica Cañitas de Felipe Pescador del estado de Zacatecas, México.

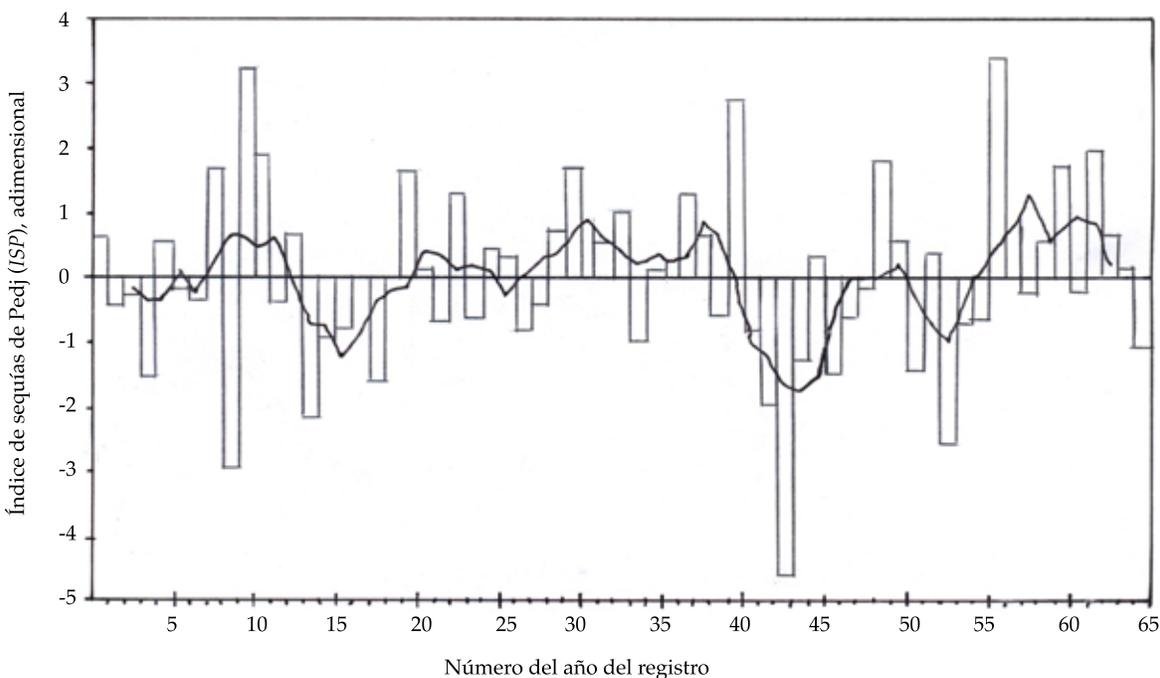


Figura 3. Serie cronológica del índice de sequías de Pedj en barras y curva de promedios móviles de orden 5 en la estación climatológica Nochistlán del estado de Zacatecas, México.

### Verificación de la homogeneidad

A cada serie cronológica del *ISP* anual se le realizó un análisis de calidad estadística, buscando componentes determinísticas con tres pruebas generales (test de Helmert, Secuencias y Von Neumann) y seis específicas: dos de persistencia (Anderson y Sneyers), dos de tendencia (Kendall y Spearman), una de variabilidad (Bartlett) y una de cambio en la media (Cramer). La mayoría de estas pruebas se puede consultar en WMO (1971), Machiwal y Jha (2008, 2012), y Campos-Aranda (2015). En el cuadro 4 se concentraron los resultados de tales pruebas; se observa que sólo cuatro registros son perfectamente homogéneos, tres muestran tendencia descendente y uno ascendente, y el resto presenta persistencia, que es en realidad una característica estadística de la mayoría de las series cronológicas de lluvia y temperatura anuales. Se detecta del cuadro 4 que la persistencia está asociada con el valor de coeficiente de correlación serial de orden uno ( $r_1$ ), cuando éste es mayor de 0.200.

### Análisis regional: evidencia del cambio climático

De acuerdo con los resultados del cuadro 4, exclusivamente seis series del *ISP* son homogéneas; el resto presenta persistencia, y cuatro de ellas muestran tendencia: tres descendente y una ascendente. Por lo anterior, es conveniente buscar evidencia de cambio climático. Para ello, por simplicidad, se dividió el registro en dos periodos: de 1950 a 1981, y de 1982 a 2014, pues tal búsqueda se hizo por conteo de ocurrencias de sequías importantes. En seguida, se contabilizaron por estación y periodo los años con sequías moderadas, severas y extremas ( $ISP \geq 1.000$ ). Los resultados se muestran en el cuadro 5.

Se deduce del cuadro 5 que los indicadores de sumas de sequías importantes ( $ISP \geq 1.000$ ) por zonas deben ser considerados similares, pues aunque existen diferencias, éstas no fueron originadas por todas las estaciones de cada región, sino que unas estaciones presentan

Cuadro 4. Coeficiente de correlación serial de orden uno ( $r_1$ ) y resultados de las pruebas de homogeneidad en las 16 series anuales del índice de sequías de Pedj (*ISP*) procesadas del estado de Zacatecas, México.

Núm.	Estación	$r_1$	Resultados de las pruebas de homogeneidad
1	Cañitas de Felipe Pescador	0.262	Oscila poco según pruebas básicas, con persistencia y tendencia ascendente
2	Río Grande	0.044	Homogénea
3	Fresnillo	0.291	Oscila poco según pruebas básicas y presenta persistencia
4	Leobardo Reynoso	0.029	Homogénea
5	Villa de Cos	0.222	Homogénea, muestra persistencia
6	Santa Rosa	0.209	Oscila poco según pruebas básicas, con persistencia y tendencia descendente
7	San Pedro Piedra Gorda	0.358	Oscila poco según pruebas básicas y presenta persistencia
8	Villa García	0.169	No homogénea, según pruebas básicas
9	Pinos	0.405	Oscila poco según pruebas básicas y presenta persistencia
10	Zacatecas	0.335	Oscila poco según pruebas básicas y presenta persistencia
11	Villanueva	0.224	Oscila poco según pruebas básicas, con persistencia y tendencia descendente ligera
12	Presa El Chique	0.354	Oscila poco según pruebas básicas y presenta persistencia
13	Juchipila	0.321	Oscila poco según pruebas básicas, con persistencia y tendencia descendente
14	Nochistlán	0.071	Homogénea
15	Tlaltenango	0.324	Homogénea, muestra persistencia
16	Excamé	0.102	Homogénea

Cuadro 5. Número de sequías importantes ( $ISP \geq 1.00$ ) en cada estación climatológica procesada en el periodo indicado.

Periodo	Estaciones de la zona norte						Suma norte	Estaciones de la zona centro					Suma centro	Estaciones de la zona sur					Suma sur
	1	2	3	4	5	6		7	8	9	10	11		12	13	14	15	16	
1950-1981	6	8	5	11	7	11	48	8	11	7	12	11	49	4	10	8	6	10	38
1982-2014	10	9	8	8	6	11	52	10	8	11	12	7	48	12	2	5	7	6	32

más sequías en el primer periodo y otras en el segundo; por ejemplo, las estaciones 9 (Pinos) y 11 (Villanueva) de la zona centro. Además, en cada zona geográfica existen estaciones con número semejante de sequías por periodo, por ejemplo, las número 2, 5, 6, 10 y 15. Por lo tanto, no existe evidencia regional de cambio climático en las sequías meteorológicas anuales del estado de Zacatecas, México, de acuerdo con el *ISP*.

#### *Análisis local: secuencias mínimas de cinco años*

Con base en la técnica de promedios móviles de orden cinco, se identificaron en las 16 series cronológicas del *ISP* las tres secuencias mínimas, cuyos valores y ubicación se detallan en el cuadro 6. Las secuencias más extremas de la

zona norte las definen las estaciones Fresnillo y Villa de Cos, ocurriendo en la primera en el lapso de 1979 a 1985 y en la segunda de 1960 a 1966. En la zona centro, en la estación Pinos, se presentaron las secuencias más severas en el periodo de 1999 a 2005, y por último, en la zona sur, las secuencias más extremas de cinco años ocurrieron en varias estaciones en el inicio de la década de 1950 y en el final del decenio de 1990, por ejemplo en la presa El Chique.

#### *Análisis local: los diez años más secos*

A partir de las series de valores *ISP* ordenados de mayor a menor se seleccionan los diez más grandes y se obtienen sus años de ocurrencia. Tales valores del *ISP* y sus años respectivos se han concentrado en el cuadro 7. En las series

Cuadro 6. Promedios y lapsos de las tres secuencias máximas de cinco años en las series cronológicas del *ISP* en las 16 estaciones climatológicas procesadas del estado de Zacatecas, México.

Núm.	Estación	Zona	Primera secuencia	Segunda secuencia	Tercera secuencia
1	Cañitas de Felipe Pescador	Norte	1.671 (1997-2001)	1.516 (1974-1978)	1.510 (1977-1981)
2	Río Grande	Norte	1.510 (2010-2014)	1.123 (2009-2013)	1.057 (1978-1982)
3	Fresnillo	Norte	2.525 (1981-1985)	2.064 (1980-1984)	1.862 (1979-1983)
4	Leobardo Reynoso	Norte	1.251 (1978-1982)	1.148 (1950-1954)	0.991 (1994-1998)
5	Villa de Cos	Norte	2.030 (1961-1965)	1.735 (1962-1966)	1.513 (1960-1964)
6	Santa Rosa	Norte	1.467 (1953-1957)	1.349 (1994-1998)	1.337 (1978-1982)
7	San Pedro Piedra Gorda	Centro	2.286 (1950-1954)	1.810 (1951-1955)	1.793 (2008-2012)
8	Villa García	Centro	1.349 (1961-1965)	1.345 (1962-1966)	1.194 (1978-1982)
9	Pinos	Centro	2.533 (2000-2004)	2.508 (2001-2005)	2.046 (1999-2003)
10	Zacatecas	Centro	2.012 (1959-1963)	1.996 (1960-1964)	1.445 (1961-1965)
11	Villanueva	Centro	1.811 (1978-1982)	1.519 (1979-1983)	1.429 (1977-1981)
12	Presa El Chique	Sur	1.961 (1953-1957)	1.867 (1996-2000)	1.749 (1997-2001)
13	Juchipila	Sur	1.445 (1953-1957)	1.429 (1950-1954)	1.344 (1965-1969)
14	Tlaltenango	Sur	1.806 (1961-1965)	1.651 (1960-1964)	1.220 (1998-2002)
15	Nochistlán	Sur	1.273 (2005-2009)	0.984 (1978-1982)	0.945 (2008-2012)
16	Excamé	Sur	2.061 (1950-1954)	1.554 (1951-1955)	1.177 (1953-1957)

de valores ordenados del ISP se detecta que el número de sequías ( $ISP > 0$ ) varía de 29 en Cañitas de Felipe Pescador a 40 en Tlaltenango; el número de sequías extremas, severas y moderadas ( $ISP \geq 1.0$ ) varía de 12 en Juchipila a 24 en Zacatecas. Además, se observa en el cuadro 7 que los valores extremos máximos del ISP se presentan en Villa de Cos y Fresnillo, con 4.331 y 4.003, respectivamente; pero pueden ser

tan bajos como 2.615 y 2.634, que ocurren en Tlaltenango y Villa García.

### *Análisis regional: estaciones climatológicas afectadas*

Para obtener en cuáles años se presentó el mayor número de sequías más importantes o extremas (valores del cuadro 7), se realizó una tabulación

Cuadro 7. Valores de los diez mayores índices de sequía de Pedj (ISP) anuales y sus años respectivos en las 16 estaciones climatológicas procesadas del estado de Zacatecas, México.

Núm.	Nombre	Dato	Valores máximos del ISP en orden decreciente de magnitud y sus años respectivos									
			10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1	Cañitas de Felipe Pescador	ISP	3.460	2.925	2.512	2.424	2.379	2.213	2.152	1.961	1.866	1.690
		Año	1974	1980	1975	1977	2012	1999	2001	1979	2009	2011
2	Río Grande	ISP	3.845	3.304	3.192	2.637	2.447	2.353	1.810	1.804	1.745	1.625
		Año	2011	1989	1982	2012	2014	1995	1977	1998	1957	1956
3	Fresnillo	ISP	4.003	3.066	2.608	2.446	2.142	1.837	1.729	1.279	1.277	1.195
		Año	1982	2011	1981	1985	2012	1984	1983	1960	1964	1965
4	Leobardo Reynoso	ISP	2.648	2.608	2.335	2.234	2.177	2.075	1.985	1.920	1.695	1.683
		Año	1994	1982	1969	1952	2011	1998	1962	1954	1989	1993
5	Villa de Cos	ISP	4.331	2.418	2.348	2.050	2.001	1.587	1.465	1.440	1.358	1.338
		Año	1963	1964	1965	1954	1995	1989	1974	1998	1973	1956
6	Santa Rosa	ISP	2.730	2.626	2.429	2.303	2.125	2.087	1.986	1.882	1.846	1.819
		Año	1962	1957	2014	1956	1969	1996	1964	1994	1954	1950
7	San Pedro Piedra Gorda	ISP	2.793	2.766	2.674	2.660	2.523	2.444	2.074	1.869	1.787	1.684
		Año	1950	2011	1954	1969	1952	2009	1982	2012	1951	1979
8	Villa García	ISP	2.634	2.580	2.481	2.198	2.190	2.063	1.958	1.721	1.697	1.651
		Año	1954	1962	1965	2011	1982	1957	2009	2000	1969	1999
9	Pinos	ISP	3.503	3.488	2.784	2.776	2.316	2.272	2.232	1.953	1.735	1.486
		Año	1987	2001	2003	2004	2002	1962	1969	1977	1968	1954
10	Zacatecas	ISP	3.084	2.988	2.451	2.360	2.297	2.226	2.226	2.174	1.998	1.650
		Año	1957	1962	2005	1963	1961	1960	1982	1954	1950	2013
11	Villanueva	ISP	3.230	2.410	2.403	2.237	2.005	1.929	1.87	1.553	1.486	1.646
		Año	1969	1994	1982	1979	2012	2011	1963	1978	1981	1960
12	Presa El Chique	ISP	3.873	3.642	2.952	2.772	2.512	1.955	1.935	1.884	1.777	1.775
		Año	2011	1957	1953	1998	2009	2000	1961	1989	1999	1993
13	Juchipila	ISP	3.242	3.151	2.623	2.229	2.217	2.086	2.021	1.984	1.739	1.614
		Año	1957	1968	1994	2011	1956	1967	1952	1972	1950	1951
14	Tlaltenango	ISP	2.615	2.612	2.177	2.028	1.835	1.769	1.662	1.637	1.454	1.441
		Año	1962	1950	2011	1963	1972	1998	1964	2000	1965	1999
15	Nochistlán	ISP	3.412	3.248	2.791	1.955	1.897	1.796	1.767	1.663	1.608	1.591
		Año	2005	1959	1989	2011	1960	1998	2009	1979	1969	1957
16	Excamé	ISP	3.330	2.962	2.845	2.661	2.501	2.493	2.323	2.164	2.097	1.982
		Año	1994	1969	2011	1967	1957	1954	1951	1950	1952	1972

por zona geográfica, con 65 renglones relativos a cada año del periodo analizado (1950-2014) y diez columnas para los órdenes de magnitud decrecientes (10, 9, . . . , 2, 1). Después, cada uno de los diez años de cada registro (cuadro 7) se llevó a la tabulación de su zona, marcando únicamente su ocurrencia en el renglón y columna que les corresponde; se sumaron los respectivos órdenes de magnitud y se designaron por SUM.

Los años con tres o más ocurrencias, es decir, estaciones climatológicas afectadas (ECA) con sequías más extremas, se citan en el cuadro 8. Se observa que exclusivamente la sequía del año 2011 abarcó las tres zonas geográficas. Por otra parte, en la zona norte, las sequías más extremas fueron las de 1982 y 2011, con SUM igual a 27 y 26, respectivamente. En cambio, en la zona centro, sus cinco años con sequías más extremas y frecuentes fueron de severidad similar. Finalmente, en la zona sur destacan los años 2011 y 1957 por su severidad, a través del valor de SUM. Del cuadro 8 se deduce que son más frecuentes las sequías en la zona norte.

### Contraste con el $RDI_{ST}$

Como el índice de Pedj es uno de los primeros algoritmos de caracterización de sequías que emplean la precipitación y la temperatura media, se consideró conveniente contrastarlo con uno de los índices más recientes y simples que emplean la evapotranspiración potencial, además de la precipitación: el  $RDI_{ST}$ . Este contraste

se basó en los porcentajes de cada tipo de sequía que definen ambos índices y en el número total de tales eventos (NTS), los cuales se han concentrado en el cuadro 9.

Con base en los resultados de las 16 series climáticas procesadas del estado de Zacatecas se observa que ambos índices presentan resultados fluctuantes; los del  $ISP$  varían notablemente en las sequías extremas y los  $RDI_{ST}$  en las severas. Respecto al NTS, que debe ser 32 o 33, el índice  $RDI_{ST}$  subestima en general tal valor y el  $ISP$  es más aproximado; ambos índices sobreestiman tal magnitud en la estación Tlaltenango. En el cuadro 10 se exponen los resultados *anuales* de ambos índices para su contraste en la estación climatológica Cañitas de Felipe Pescador, una de las más discordantes entre ellos, según se observa o deduce del cuadro 9. En el cuadro 10 se observa que ambos índices detectan 22 años comunes con sequía de los 29 que tienen en total (cuadro 9) y de ellos, los 10 años siguientes coinciden en el tipo de sequía identificado: 1954, 1956, 1969, 1972, 1975, 1980, 1995, 1997, 1999 y 2010.

### Conclusiones

El *índice de sequías de Pedj (ISP)*, basado en la diferencia de las anomalías estandarizadas de la temperatura media y de la precipitación, ambas anuales, es una técnica bastante simple, que permite la detección a nivel local y regional de las sequías meteorológicas anuales, cuando tales

Cuadro 8. Años de sequías importantes con tres o más estaciones climatológicas afectadas (ECA) por zonas geográficas en el estado de Zacatecas, México.

Zona norte (EC = 6)			Zona centro (EC = 5)			Zona sur (EC = 5)		
Año	ECA	SUM	Año	ECA	SUM	Año	ECA	SUM
1954	3	12	1954	4	22	1950	3	14
1956	3	9	1962	3	23	1957	4	26
1964	3	15	1969	4	23	1972	3	10
1982	3	27	1982	4	22	1998	3	17
1989	3	16	2011	3	21	2011	5	40
1998	3	11	-	-	-	-	-	-
2011	4	26	-	-	-	-	-	-
2012	3	19	-	-	-	-	-	-

Cuadro 9. Porcentajes de los tipos de sequías y número total, estimados con el índice de Pedj y con el  $RDI_{ST}$  en las 16 estaciones climatológicas procesadas del estado de Zacatecas, México.

Núm.	Estación	Zona	Estimación con índice de sequías de Pedj					Estimación con el $RDI_{ST}$				
			%SL	%SM	%SS	%SE	NTS	%SL	%SM	%SS	%SE	NTS
1	Cañitas de Felipe Pescador	Norte	44.8	31.0	20.7	3.4	29	62.1	13.8	20.7	3.4	29
2	Río Grande	Norte	43.3	36.7	10.0	10.0	30	68.8	18.8	3.1	9.4	32
3	Fresnillo	Norte	62.9	22.9	8.6	5.7	35	66.7	16.7	10.0	6.7	30
4	Leobardo Reynoso	Norte	44.1	38.2	17.6	0.0	34	58.6	31.0	6.9	3.4	29
5	Villa de Cos	Norte	62.9	22.9	11.4	2.9	35	74.2	12.9	9.7	3.2	31
6	Santa Rosa	Norte	26.7	53.3	20.0	0.0	30	68.8	15.6	9.4	6.3	32
7	San Pedro Piedra Gorda	Centro	45.5	33.3	21.2	0.0	33	60.7	21.4	7.1	10.7	28
8	Villa García	Centro	42.4	39.4	18.2	0.0	33	57.1	21.4	14.3	7.1	28
9	Pinos	Centro	48.6	31.4	14.3	5.7	35	64.5	16.1	9.7	9.7	31
10	Zacatecas	Centro	25.0	50.0	21.9	3.1	32	62.1	24.1	6.9	6.9	29
11	Villanueva	Centro	40.0	43.3	13.3	3.3	30	62.1	17.2	10.3	10.3	29
12	Presa El Chique	Sur	50.0	34.4	9.4	6.3	32	65.5	20.7	3.4	10.3	29
13	Juchipila	Sur	57.1	17.9	17.9	7.1	28	69.2	19.2	0.0	11.5	26
14	Tlaltenango	Sur	67.5	22.5	10.0	0.0	40	77.1	8.6	8.6	5.7	35
15	Nochistlán	Sur	59.4	31.3	3.1	6.3	32	57.7	23.1	7.7	11.5	26
16	Excámé	Sur	50.0	21.9	25.0	3.1	32	66.7	14.8	7.4	11.1	27
Valores mínimos			25.0	17.9	3.1	0.0	28	57.1	8.6	0.0	3.2	26
Valores máximos			67.5	53.3	25.0	10.0	40	77.1	31.0	20.7	11.5	35

Simbología:

%SL porcentaje de sequías leves.

%SM porcentaje de sequía moderadas.

%SS porcentaje de sequías severas.

%SE porcentaje de sequías extremas.

NTS número total de sequías.

Cuadro 10. Valores anuales de los índices de Pedj y  $RDI_{ST}$  y de sus tipos de sequía (TS) en la estación climatológica Cañitas de Felipe Pescador del estado de Zacatecas, México.

Núm.	Año	Cañitas de Felipe Pescador				Núm.	Año	Cañitas de Felipe Pescador			
		ISP	TS	$RDI_{ST}$	TS			ISP	TS	$RDI_{ST}$	TS
1	1950	-0.830		0.526		34	1983	-0.613		0.484	
2	1951	-0.106		-0.203	SL	35	1984	-0.245		-0.350	SL
3	1952	0.824	SL	-1.557	SS	36	1985	-0.693		0.322	
4	1953	-2.123		1.486		37	1986	-0.692		0.060	
5	1954	0.383	SL	-0.834	SL	38	1987	-0.289		0.178	
6	1955	-0.283		-0.007	SL	39	1988	-1.042		0.564	
7	1956	0.308	SL	-0.727	SL	40	1989	0.666	SL	-1.128	SM
8	1957	-0.735		-1.501	SS	41	1990	-0.426		0.391	
9	1958	-3.063		1.570		42	1991	-1.812		0.988	
10	1959	-1.781		1.027		43	1992	-1.289		0.233	
11	1960	-1.399		0.077		44	1993	-0.789		-0.220	SL
12	1961	-0.934		-0.152	SL	45	1994	0.430	SL	0.061	
13	1962	-0.153		-0.827	SL	46	1995	0.898	SL	-0.357	SL

Cuadro 10 (continuación). Valores anuales de los índices de Pedj y  $RDI_{ST}$  y de sus tipos de sequía (TS) en la estación climatológica Cañitas de Felipe Pescador del estado de Zacatecas, México.

Núm.	Año	Cañitas de Felipe Pescador				Núm.	Año	Cañitas de Felipe Pescador			
		ISP	TS	$RDI_{ST}$	TS			ISP	TS	$RDI_{ST}$	TS
14	1963	-0.870		0.486		47	1996	-3.415		2.507	
15	1964	-1.351		0.459		48	1997	0.874	SL	-0.656	SL
16	1965	-3.182		1.543		49	1998	1.581	SM	0.118	
17	1966	-1.847		0.601		50	1999	2.213	SS	-1.800	SS
18	1967	-1.860		1.024		51	2000	1.533	SM	-0.186	SL
19	1968	-0.673		0.384		52	2001	2.152	SS	-1.364	SM
20	1969	1.525	SM	-1.217	SM	53	2002	-0.584		1.436	
21	1970	-0.784		0.633		54	2003	-0.373		1.199	
22	1971	-0.129		0.580		55	2004	0.050	SL	0.572	
23	1972	0.973	SL	-0.555	SL	56	2005	1.043	SM	0.053	
24	1973	-0.876		1.149		57	2006	0.633	SL	0.580	
25	1974	3.460	SE	-1.603	SS	58	2007	1.415	SM	-0.671	SL
26	1975	2.512	SS	-1.680	SS	59	2008	-0.014		0.626	
27	1976	-1.214		1.097		60	2009	1.866	SM	-0.572	SL
28	1977	2.424	SS	-1.089	SM	61	2010	0.813	SL	-0.815	SL
29	1978	0.400	SL	1.067		62	2011	1.690	SM	-2.233	SE
30	1979	1.961	SM	-0.932	SL	63	2012	2.379	SS	-0.776	SL
31	1980	2.925	SS	-1.778	SS	64	2013	-2.652		1.614	
32	1981	-0.160		0.383		65	2014	0.061	SL	0.336	
33	1982	1.290	SM	-0.623	SL	-	-	-	-	-	-

Simbología:

TS, tipo de sequía: SL, leve; SM, moderada; SS, severa; SE, extrema.

series se analizan en un *periodo común*. Para el caso expuesto, del estado de Zacatecas, México, se procesaron 16 series del *ISP* con 65 años, durante el lapso común de 1950 a 2014, integradas en tres zonas geográficas: norte, centro y sur.

La detección *local* de las sequías se ilustró en el cuadro 3; en cambio, los resultados *regionales* mostraron que los años con tres o más estaciones climatológicas afectadas, según resultados del cuadro 8, fueron: 1950, 1954, 1956, 1957, 1962, 1964, 1969, 1972, 1982, 1989, 1998, 2011 y 2012. Sólo la sequía del año 2011 tuvo presencia generalizada e importante.

Debido a la sencillez que presenta el cálculo de las series del *ISP* y a la importancia implícita de los resultados de los análisis local y regional para la detección y el seguimiento de las sequías meteorológicas anuales se recomienda su aplicación sistemática. Lo anterior permitirá

verificar los resultados de otros índices de sequías, como se mostró en el inciso relativo al contraste entre el *ISP* y el  $RDI_{ST}$ ; además, hará posible ampliar el entendimiento sobre el comportamiento de las sequías como serie cronológica, orientado esto último a su pronóstico (Mishra & Singh, 2011).

## Agradecimientos

Se reconoce la excelente disposición del ingeniero Humberto Abelardo Díaz Valdéz de la Dirección Local Zacatecas de la Conagua, para proporcionar al autor la actualización de la información climatológica procesada.

Se agradecen los comentarios y sugerencias de los árbitros anónimos 1 y 2. Las correcciones del primero mejoraron la presentación de resultados y ayudaron a su interpretación; la sugerencia del segundo árbitro permitió el contraste con el  $RDI_{ST}$ .

## Referencias

- Almanza, R., & López, S. (1975). *Radiación solar global en la república mexicana mediante datos de insolación* (20 pp.). Series del Instituto de Ingeniería 357. México, DF: UNAM.
- Campos-Aranda, D. F. (2005). Estimación de la evapotranspiración. Capítulo 3 (pp. 65-96). En: *Agroclimatología cuantitativa de cultivos*. México, DF: Editorial Trillas.
- Campos-Aranda, D. F. (2014). Comparación de tres métodos estadísticos para detección y monitoreo de sequías meteorológicas. *Agrociencia*, 48(5), 463-476.
- Campos-Aranda, D. F. (2015). Búsqueda de tendencias en la precipitación anual del estado de Zacatecas, México; en 30 registros con más de 50 años. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, 16(3), 357-370.
- Elagib, N. A., & Elhag, M. M. (2011). Major climate indicators of ongoing drought in Sudan. *Journal of Hydrology*, 409(3-4), 612-625.
- Gruza, G., Rankova, E., Razuvaev, V., & Bulygina, O. (1999). Indicators of climate change for the Russian Federation. *Climatic Change*, 42(1), 219-242.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1982). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(IR3), 225-230.
- Kunkel, K. E., Pielke, R. A., & Changnon, S. A. (1999). Temporal fluctuations in weather and climate extremes that cause economic and human health impacts: A review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(6), 1077-1098.
- Lobato-Sánchez, R. (2016). El monitor de la sequía en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(5), 197-211.
- Machiwal, D., & Jha, M. K. (2008). Comparative evaluation of statistical tests for time series analysis: Applications to hydrological time series. *Hydrological Sciences Journal*, 53(2), 353-366.
- Machiwal, D., & Jha, M. K. (2012). Methods for time series analysis (Chapter 4, pp. 51-84). In: *Hydrologic time series analysis: Theory and practice*. Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Mawdsley, J., Petts, G., & Walker, S. (1994). *Assessment of drought severity* (41 pp.). Occasional Paper No. 3. London: British Hydrological Society.
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 202-216.
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2011). Drought modeling-A review. *Journal of Hydrology*, 403(1-2), 157-175.
- Potop, V., & Soukup, J. (2009). Spatiotemporal characteristics of dryness and drought in the Republic of Moldova. *Theoretical and Applied Climatology*, 96(3-4), 305-318.
- Qian, W., & Zhu, Y. (2001). Climate change in China from 1880 to 1998 and its impact on the environmental conditions. *Climatic Change*, 50(4), 419-444.
- Tsakiris, G., & Vangelis, H. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9/10, 3-11.
- Tsakiris, G., Tigkas, D., Vangelis, H., & Pangalou, D. (2007). Regional drought identification and assessment. Chapter 9 (pp. 169-191). In: *Methods and tools for drought analysis and management*. Rossi, G., Vega, T., & Bonaccorso, B. (eds.). Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- WMO (1971). Standard tests of significance to be recommended in routine analysis of climatic fluctuations (Annexed III, pp. 58-71). In: *Climatic Change*. Technical Note No. 79, WMO-No. 195. Geneva: Secretariat of the World Meteorological Organization.

## Dirección institucional del autor

Dr. Daniel Francisco Campos Aranda

Profesor jubilado

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
Genaro Codina # 240, Col. Jardines del Estadio  
78280 San Luis Potosí, S.L.P., MÉXICO  
campos\_aranda@hotmail.com



Hierve el Agua, Oaxaca, Oaxaca, México.

Foto: José Luis Martínez.

# 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.



Remanso del río Cachapoal, comuna de Pichidegua, Chile.

Foto: Vanessa Novoa.

# GUÍA PARA COLABORADORES

## TIPO DE COLABORACIONES

La revista *Tecnología y Ciencias del Agua* publica trabajos que brinden aportaciones originales científicas y tecnológicas sobre el recurso agua y su entorno.

Las colaboraciones deben ser artículos o notas **inéditas**.

**Artículo:** documento científico que trata y comunica por primera vez los resultados de una investigación o innovación exitosa, cuyas contribuciones aportan e incrementan el conocimiento actual en materia de agua; 30 cuartillas máximo.

**Nota:** 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; 15 cuartillas máximo.

**Campos temáticos:**

- Agua y energía.
- Calidad del agua.

- Ciencias hidrográficas.
- Ciencias políticas y sociales.
- Gestión del agua.
- Hidrología
- Hidráulica.

## IDIOMAS

Los textos pueden remitirse en español o inglés.

Al momento de ser aceptado el trabajo para su publicación, los autores deberán enviar la versión final en los dos idiomas: español e inglés.

## FORMATO

**Tipo de letra:** Verdana en todo el documento (cuerpo del texto, cuadros e ilustraciones).

**Tamaño de letra:** el documento se presentará en 16, 14, 13 y 12 puntos de acuerdo con el siguiente cuadro (**remitirse a la platilla para preparar manuscritos**):

Elemento	Tamaño de fuente	Alineación	Estilo	Espacios	Observaciones
Sección	12 puntos	Alineado a la derecha	Mayúsculas y minúsculas	Una línea en blanco, antes y después de su inserción	
Título original	14 puntos	Centrado	Negritas	Una línea en blanco entre título original y título traducido	
Título traducido	14 puntos	Centrado	Negritas	Una línea en blanco entre título traducido y los autores	Si hay más traducciones, escribir cada una en una línea diferente
Resumen	12 puntos	Alineado a la izquierda	Negritas	Sin línea en blanco entre la palabra resumen y el texto	
Texto del resumen	12 puntos	Justificado	Normal	Sin línea en blanco entre el texto y las palabras clave	
Palabras clave	12 puntos	Alineado a la izquierda	Negritas	Una línea en blanco entre las palabras clave y el <i>abstract</i> . Cada una de las palabras clave separadas por coma o punto y coma	
<i>Abstract</i>	12 puntos	Alineado a la izquierda	Negritas	Sin línea en blanco entre la palabra <i>Abstract</i> y el texto	
<i>Keywords</i>	12 puntos	Alineado a la izquierda	Negritas	Una línea en blanco entre el <i>Abstract</i> y <i>Keywords</i> . Cada una de las <i>keywords</i> deben ir separadas por coma	
Texto del <i>abstract</i>	12 puntos	Justificado	Normal	Sin línea en blanco entre el texto y las palabras clave	
Títulos de sección	16 puntos	Centrado	Negritas	Dos líneas en blanco antes del título de sección y otras dos después	
Subtítulos de sección	14 puntos	Centrado	Negritas	Una línea en blanco antes del Subtítulo de sección y otra después	Cuando existan subsecciones de subsección formatear en tamaño 13, negrita y centrado
Cuerpo del texto	12 puntos	Justificado	Normal	NO debe haber saltos de línea entre párrafos	
Mención de imágenes en el texto	12 puntos		Respetar estilo del impreso		Letra inicial en mayúscula
Imagen		Centrado			Las imágenes como figura, gráficos, fotos, mapas, deberán incrustarse después de su mención al final del párrafo
Título de las imágenes	12 puntos	Centrado	Negritas	Sin espacios	Las imágenes como tablas, cuadros, fórmulas, quedarán como texto; en caso de que no se puedan representar o que sean complejas, se insertarán como imagen

Elemento	Tamaño de fuente	Alineación	Estilo	Espacios	Observaciones
Descripción de la imagen	12 puntos	Centrado	Normal	Sin espacios	Todas las notas al pie de imagen van centradas
Agradecimientos	12 puntos	Centrado	Negritas	Una línea en blanco antes y después	
Referencias	12 puntos	Justificado	Normal	Renglón por referencia	La palabra Referencias en negritas

**Interlineado:** 1 (simple).

**Márgenes:** superior-inferior: 2.5cm, laterales: 3cm.

**Numeración de páginas:** todas las páginas deben ir numeradas.

#### Extensión

- **Artículo:** 30 cuartillas (numeradas), incluyendo figuras y cuadros.
- **Nota:** 15 cuartillas (numeradas), incluyendo figuras y cuadros.

**Cuartilla:** se considera que una cuartilla contiene 235 palabras.

**Columnas:** a una columna.

#### Contenido

##### 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, 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.

##### Figuras y cuadros

Figuras y cuadros dentro del texto, donde deben aparecer. Deberán tener alta resolución.

**Nota:** esas mismas figuras remitirlas individualmente en archivos independientes (formatos TIF, JPG o EPS) en alta resolución (300 ppp); los cuadros no deben ser imágenes, sino texto editable.

##### Referencias

En formato APA sexta edición 2017

Dentro del texto se usará el sistema APA de citación Autor-Fecha.

Las referencias al final del trabajo deben estar en orden alfabético.

##### 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.xxxxxx>

###### Capítulos de libros

Apellido, A. A., & Apellido, B. B. (Año). Título del capítulo o entrada (pp. xxx-xxx). En: *Título del libro*. Apellido, A., Apellido, B., & Apellido, C. (eds.). Ciudad de edición: Editorial.

Apellido, A. A., & Apellido, B. B. (Año). Título del capítulo o entrada (pp. xxx-xxx). En: *Título del libro*. Apellido, A., Apellido, B., & Apellido, C. (eds.). Ciudad de edición: Editorial. Recuperado de <http://www.xxxxxx>

###### Artículo o nota de publicación periódica recuperado de la web

Apellido, A. A., & Apellido, B. B. (Año). Título del artículo. *Título de la publicación, volumen*(número), pp. Recuperado de <http://www.xxxxxx>

###### Artículo o nota de publicación periódica impresa

Apellido, A. A., & Apellido, B. B. (Año). Título del artículo. *Título de la publicación, volumen*(número), pp.

###### Artículo de publicación periódica con DOI

Apellido, A. A., Apellido, B. B., & Apellido, C. C. (Año). Título del artículo. *Título de la publicación, volumen*(número), pp, 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.

###### Separación de números y uso de punto decimal

Se marcará la división entre millares con un espacio en blanco; para separar los números enteros de sus fracciones, cuando las haya, se usará el punto.

Al respecto, se retoma lo que indica el *Diccionario panhispánico de dudas*, editado por la Real Academia Española y la Asociación de Academias de la Lengua Española, en 2005, sobre las expresiones numéricas: "se acepta el uso anglosajón del punto, normal en algunos países hispanoamericanos...:  $\pi = 3.1416$ ".

###### Carta de originalidad

Es **indispensable** remitir, la **Carta de originalidad** firmada por el autor que envía el trabajo (autor de correspondencia) en el paso 4 del envío «Cargar archivos complementarios».

###### Envío de trabajos

Para enviar un artículo debe hacerlo a través del sistema OJS en la URL: <http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/login>

**Recuerde:** el archivo del trabajo no debe incluir datos de los autores, estos deben ser registrados en el sistema OJS en la sección "INTRODUCIR METADATOS" en el apartado "Autores/as" y una vez terminado el proceso de envío no podrá ser modificado.

En caso de no tener cuenta puede registrarse en: <http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/user/register>

Para dudas con respecto al uso del sistema puede escribir un correo a [tyca.soporte.ojs@gmail.com](mailto:tyca.soporte.ojs@gmail.com)