

IDENTIFICACIÓN DE LOCALIDADES RURALES DE QUERÉTARO, MÉXICO, PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE DESINFECCIÓN SOLAR EN AGUA DE LLUVIA CAPTADA

IDENTIFYING RURAL COMMUNITIES OF QUERETARO, MEXICO, WHERE RAINWATER HARVESTING AND ITS SOLAR DISINFECTION MAY BE IMPLEMENTED

Duhne-Ramírez, Marcela Susana¹; Domínguez-Cortazar, Miguel Ángel²; Ventura-Ramos, Eusebio²; Ruiz-González, Israel¹

Resumen

El acceso al agua potable es una necesidad de la población; sin embargo, hoy en día aún hay localidades sin acceso a fuentes mejoradas de agua potable. En México, esto representa a más de 7 millones de habitantes. En la presente investigación se realiza una evaluación multicriterio (EMC) con el fin de jerarquizar las poblaciones con una mayor necesidad y factibilidad para implementar captación pluvial, y posteriormente desinfección solar en las mismas. Por lo cual, se identificaron las localidades rurales del estado de Querétaro cuya población no tiene acceso al agua potable. Para el análisis espacial se utilizó el software ArcGIS 9.3. Ocho, fueron los criterios considerados para la evaluación, siendo el principal, en lo social, el índice de marginación y, análogamente en los criterios climatológicos, el principal fue la precipitación media anual (PMA). Las alternativas fueron las localidades de más de 50 y menos de 2500 habitantes, en las cuales ninguna de sus viviendas tiene acceso al agua potable en su terreno, de acuerdo al Censo de Población y Vivienda de México del 2010. Posteriormente, a cada alternativa se les asignó un valor por cada criterio el cuál se estandarizó en una escala de 0 a 1 y multiplicó por un factor de ponderación por criterio para obtener un valor por alternativa. Los resultados obtenidos fueron 138 alternativas identificadas, las cuales se jerarquizaron obteniendo valores entre los rangos de 0.414 y 0.7397. De esta manera, se cumplió con el objetivo de la investigación y se observa que la EMC con apoyo de sistemas de información geográficos es una alternativa para identificar localidades aptas para implementar desinfección solar en agua de lluvia captada. Posterior a esta investigación, se requiere ir a las diferentes localidades para verificar la información y las condiciones de cada localidad.

Palabras clave: sistemas de información geográfica, evaluación multicriterio, sistemas de captación pluvial

ABSTRACT

Access to drinking water is a population need; however, currently there are still communities without access to safe sources of drinking water. In Mexico, this situation represents more than 7 million inhabitants. In this study, a multi-criteria analysis (MCA) was performed with the purpose to prioritize communities with a greater need and feasibility to implement rainwater harvesting followed by solar disinfection. Rural communities with no access to drinking water were identified in the state of Queretaro. For the spatial analysis, the software ArcGIS 9.3 was used. Eight criteria were considered for the evaluation, with the index of marginalization, and the mean annual precipitation (MPA), being the most important social and climatological criteria, respectively. The alternatives were communities with more than 50 and less than 2500 inhabitants without access to drinking water, according to the 2010 Population and Housing Census of Mexico. Each alternative was assigned a value for each criterion, which was standardized on a scale from 0 to 1 and multiplied by a weighting factor per criterion to obtain the value for the alternative. The results obtained were 138 identified alternatives, which were prioritized with values bearing from 0.414 to 0.7397. In this way, the goal of the study was achieved and it was observed that MCA with the support of geographical information systems is an alternative to identify communities subject to the implementation of solar disinfection in the rainwater harvested. Following this research, it is necessary to visit the different communities to verify the information and the local conditions.

Key words: geographic information systems, multi-criteria decision analysis, rainwater harvesting systems

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural indispensable para vida en la Tierra, sin embargo, únicamente el 0.1 por ciento de ésta, es apropiada para consumo humano. La disponibilidad de ésta varía por ubicación geográfica y temporalmente (Conagua, 2014), lo cual representa una posible escasez de este recurso en ciertos lugares o tiempos, ésta se acentúa en las comunidades rurales

dónde el abastecimiento de agua potable mediante redes no es una opción viable, puesto que las casas no siempre se localizan cercanas entre sí. De acuerdo al Informe del 2014 de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), 783 millones de personas aún no tienen acceso a fuentes mejoradas de agua potable (ONU, 2014); en México, esto representa más de

¹ División de Investigación y Posgrado. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro. Teléfono: (+52 442) 192 1200 ext. 3591. marcela.duhne@uaq.mx

² Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro.

siete millones de habitantes (Conagua, 2014) que viven en localidades con menos de 2500 habitantes en una superficie de 100 km² (Villalazo *et al.*, 2002) y no tienen acceso a 100 L/persona/día de agua potable para utilizar en las actividades de consumo, saneamiento, lavado de ropa, preparación de alimentos e higiene personal y doméstica (OACDH, 2011). Estas comunidades, debido a su dispersión y baja población, carecen de acceso al agua potable y deben satisfacer sus necesidades más básicas acudiendo a fuentes de abastecimiento públicas, adquiriendo el agua a través de pipas (camiones que la distribuyen), o recorriendo grandes distancias para dotarse del agua de manantiales. En este contexto, se plantea como alternativa para la obtención de agua, la captación pluvial.

La captación pluvial es una técnica que comenzó como una forma rudimentaria de irrigación hace más de 5000 años en Mesopotamia, la cual, debido a la contaminación microbiológica y mineral del agua superficial y subterránea, así como la escasez del recurso, se ha vuelto más relevante a nivel mundial en la actualidad. Esta técnica, implementada a pequeña escala por medio de techumbres, se utiliza como abastecimiento de agua potable para uso doméstico. Los componentes básicos de dicho sistema son el área de captación o techumbre, el sistema de conducción (canaletas y tuberías), cisterna o estructura de almacenamiento con su tubería de drenado y tubería de exceso, y un sistema de tratamiento (al menos desinfección) (Jordan *et al.*, 2008). Para su diseño se requiere considerar la precipitación media anual (PMA), la demanda de agua a cubrir, el tamaño del techo y la calidad del agua, con el fin de poder dimensionar la cisterna a implementar así como el sistema de tratamiento del agua (Anaya & Martínez, 2007).

Cabe destacar que, pese a que el agua de lluvia se considera como no contaminada, su calidad es alterada debido a la contaminación atmosférica, la contaminación animal y vegetal, la condición y tipo de material que compone el techo, así como la ubicación y condiciones de almacenamiento de la misma (Ahammed & Meera, 2006; Jordan *et al.*, 2008). Por tal motivo el agua de lluvia requiere de un tratamiento previo a su consumo y uso doméstico. La revisión de la literatura indica que los sistemas de captación de agua de lluvia contaminan el agua captada principalmente microbiológicamente (Ahammed & Meera, 2006). La presencia de microorganismos como virus, bacterias y parásitos, causan enfermedades gastrointestinales, las cuales son el principal problema de salud en México. Los niños menores de cinco años son el grupo más vulnerable a este tipo de padecimientos que provocan diarrea aguda y, en ocasiones, muerte por deshidratación (Conagua, 2007). Las enfermedades se pueden reducir asegurando que toda persona tenga acceso a siete litros al día de agua potable para beber, cocinar, limpiar alimentos y lavarse las manos.

Para asegurar la calidad del agua captada, se plantea la desinfección solar como método de tratamiento, ya que no genera residuos, como la aplicación de cloro, ni requiere de una fuente de energía externa, como el fuego. Este método utiliza la radiación ultravioleta tipo A y radiación infrarroja (responsable de incrementar la temperatura) para inactivar las células de los microorganismos, como mencionan Solarte *et al.* (1997) y Bosshard *et al.* (2010) en sus investigaciones de *Vibrio cholerae* y *Escherichia coli*, respectivamente. Para realizar una desinfección solar se requiere tener un fluido almacenado o fluyendo en un contenedor o tubo transparente por la parte superior para que la radiación penetre al fluido. A su vez, el contenedor se pinta de color negro por la parte inferior permitiendo que el agua aumente de temperatura. La variable que se requiere monitorear para poder realizar este procedimiento de desinfección solar es la radiación solar medida en Wh/m² por día. Ésta se puede obtener por medio de estaciones climatológicas con piranómetros. Se requiere un valor mayor a 500 W/m² para poder realizar la desinfección solar (Solarte *et al.*, 1997).

La evaluación multicriterio (EMC) es la metodología utilizada en la presente investigación. Ésta corresponde a un conjunto de técnicas estadísticas orientadas a asistir en los procesos de toma de decisiones, ya que permite describir, ordenar, jerarquizar, seleccionar o rechazar un número de alternativas partiendo de múltiples criterios y objetivos en conflicto (Gómez & Barredo, 2006). La EMC integra el uso de Sistemas de Información Geográficos (SIG) para llevar a cabo procedimientos espaciales y temáticos simultáneos de análisis. La EMC que se aplicó en esta investigación tiene el objetivo de identificar y priorizar las comunidades rurales del estado de Querétaro sin acceso al agua potable aptas para implementar captación pluvial y desinfección solar del agua recolectada. Por lo cual, adicional a los criterios climatológicos inherentes a los lugares a evaluar como la precipitación media anual y la radiación, se consideraron criterios socioeconómicos. Estos buscan priorizar y analizar la viabilidad de implementar proyectos de captación pluvial y desinfección solar en las comunidades rurales. La principal variable a considerar es el índice de marginación. Acorde a De la Vega *et al.* (2012), el índice de marginación es una medida-resumen que permite diferenciar localidades del país según el impacto global de las carencias que padece la población y busca establecer un parámetro analítico que permita entender cuándo un sector de la sociedad se encuentra en una situación donde no están presentes las oportunidades para el desarrollo, ni la capacidad para encontrarlas. El Consejo Nacional de Población (CONAPO), desde 1990, considera tres dimensiones (educación, vivienda e ingreso) de la marginación de las localidades las cuales componen este índice. Asimismo, este índice es utilizado por la Secretaría de Desarrollo

Social y la Comisión Nacional del Agua para dar prioridad en la asignación de recursos económicos. Por otro lado, también se debe considerar que la presencia de instituciones como escuelas y centros de salud indican la posibilidad de a través de las mismas capacitar a la población, habiendo así foros existentes dónde la población se reúne.

2. METODOLOGÍA

2.1 Zona de estudio: Estado de Querétaro

La zona de estudio es el Estado de Querétaro, en México. Éste se ubica geográficamente en el centro de la república y tiene una superficie de 11699 km². Su extensión representa el 0.6 por ciento del territorio nacional y lo ubica en el lugar 27 por extensión territorial a nivel nacional.

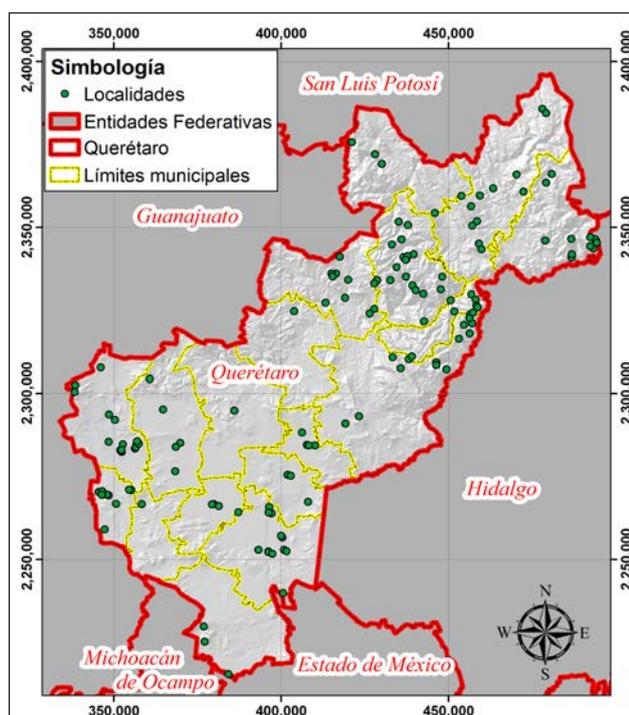


Figura 1. Localidades rurales del Estado de Querétaro, México, con más de 50 habitantes y 3 viviendas que no cuentan con agua potable en ninguna de sus viviendas.

Acorde al Censo de Población y Vivienda del 2010 realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2011), este estado tiene 1 827 937 habitantes, de los cuales el 30 por ciento vive en 2631 comunidades rurales. El 97 por ciento de dicha población reside en 1275 localidades con más de 50 habitantes y 3 viviendas habitadas. El número de localidades que no cuentan con agua potable en ninguna de sus viviendas es de 138, lo que representa un total de 21426 habitantes que no disponen de agua entubada dentro de la vivienda, o fuera de la vivienda pero dentro del terreno, por lo cual deben satisfacer su necesidad mediante suministro con redes públicas, pipas, pozos, ríos,

arroyos, lagos u otro. La población que habita en dichas comunidades se ubica principalmente en los municipios de Pinal de Amoles (14.3%), Landa de Matamoros (11.9%), Querétaro (11.8%), Corregidora (10.8%) y Cadereyta de Montes (10.7%), como se muestra en la Figura 1. Por último, el 77.4 por ciento de las localidades rurales con más de 50 habitantes y 3 viviendas tienen un índice de marginación alto o muy alto (Figura 2).

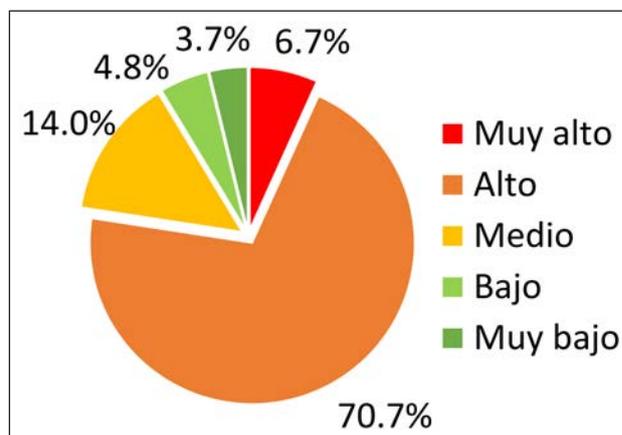


Figura 2. Índice de marginación de localidades rurales del Estado de Querétaro. (Fuente: CONAPO, 2010).

Hidrológicamente, el Estado de Querétaro es cruzado por el parteaguas continental que divide las aguas superficiales en dos vertientes como se presenta en la Figura 3. La parte suroeste del estado corresponde a la región hidrológica Lerma-Santiago (No. 12), la cual fluye al lago de Chapala y posteriormente vierte hacia el Océano Pacífico. Por otro lado, el norte del estado pertenece a la región hidrológica del Pánuco (No. 26), ésta cuenca desemboca en el Golfo de México e irriga la parte oriental. Entre los ríos principales de cada región hidrológica se encuentran el río El Pueblito y Querétaro, y el río Moctezuma, el Extoraz y el Santa María, pertenecientes a las regiones hidrológicas número 12 y 26, respectivamente. Los principales cuerpos de agua son las presas Zimapán, Constitución de 1917, San Ildefonso, Centenario, Santa Catarina, La Llave, Jalpan y La Soledad; así como la laguna del Divino Redentor. Las presas almacenan 268 millones de m³ de agua superficial. La precipitación media anual del estado es de 763 mm y la temperatura media anual es de 18°C. Cabe destacar que de acuerdo a la clasificación climatológica del INEGI, el clima es seco y semiseco en la mayor parte del estado, ubicándose en la porción central del mismo. Esta región se caracteriza por un índice bajo de precipitación y temperaturas entre los 7°C y 14°C. Al sur del estado hay climas templados subhúmedos con temperatura estable entre los 12°C y 18°C, con precipitaciones abundantes en verano y un período de sequía en el invierno. Finalmente, al norte se tienen climas cálidos y semicálidos que prevalecen

en la Sierra Gorda, las temperaturas promedio en las áreas bajas oscilan entre los 18°C y 28°C, y la precipitación media anual es de 850 mm, mientras que en la zona montañosa se tienen temperaturas entre los 14°C y 20°C, así como precipitación media anual de 1270 mm.

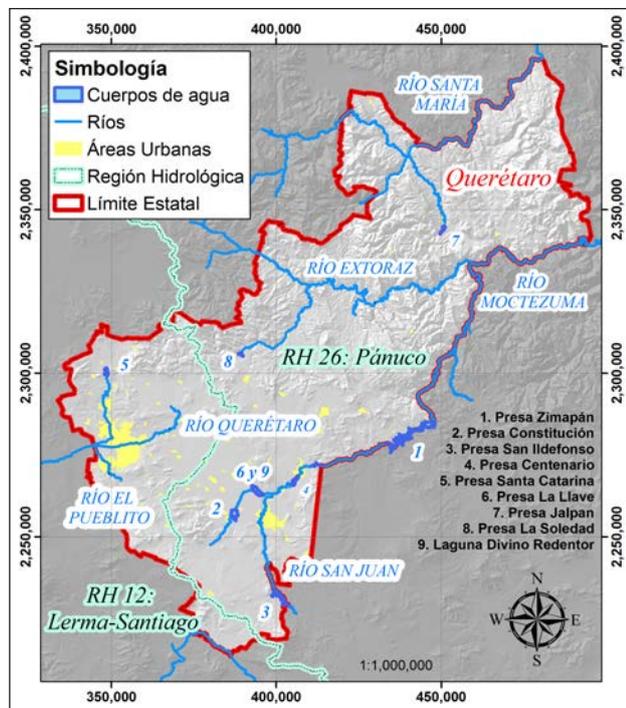


Figura 3. Mapa hidrológico del Estado de Querétaro.

2.2 Evaluación Multicriterio (EMC)

Para lograr la identificación de comunidades rurales con potencial para captación pluvial y su posterior desinfección solar, se realizó una Evaluación Multicriterio (EMC) (Gómez y Barredo, 2006), utilizando la información existente de diversas fuentes disponibles a nivel nacional, en México. De INEGI (2011) se obtuvo de manera tabular la información estadística de las localidades del Estado de Querétaro con menos de 2500 habitantes actualizada al censo de población del 2010 y la ubicación geográfica de las mismas en formato vectorial (extensión *shape*). De la Gerencia de Energías No Convencionales (2010) se consultó el Explorador de Recursos Renovables, herramienta generada por el Instituto de Investigaciones Eléctricas, para obtener los valores puntuales (por localidad) de la Irradiación Solar Global para México del 2008 y 2009. Del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2012) se obtuvo las precipitaciones medias normales de las estaciones ubicadas en Querétaro y a 5 km del límite estatal para el periodo 1981 – 2010 (estas normales climatológicas la Comisión Nacional del Agua las publica de manera mensual), así como los días de lluvia en promedio por año. De la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) se obtuvo de manera tabular el índice de marginación

calculado por CONAPO en 2010 (De la Vega *et al.*, 2012). Para analizar los datos se utilizó el software Excel, para la información tabular, y la plataforma ArcGIS 9.3, para manejar las capas con información georreferenciada (ESRI, 2008).

Primero, se definió las alternativas a evaluar: localidades rurales del Estado de Querétaro. De acuerdo a la definición del INEGI, son poblaciones con menos de 2500 habitantes (criterio adaptado desde el Censo de Población de 1970 por el INEGI). Únicamente se consideraron aquellas con ninguna vivienda particular habitada con agua entubada dentro de la vivienda o en el terreno de la misma. Asimismo, se consideraron localidades con más de 3 viviendas habitadas, ya que debido al principio de confidencialidad que marca la Ley del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica, el INEGI no genera información para unidades geográficas que tienen menos de tres viviendas. Por último, se identificó que del 81.7 por ciento de la población que habita en las comunidades antes descritas tiene más de 50 habitantes y habita en menos del 40 por ciento de las localidades.

En seguida, cada alternativa se caracterizó con base a los criterios o factores. Éstos fueron la base para la toma de decisión. Cada criterio se convirtió en el sistema de información geográfica (SIG) a una capa de información, por lo cual se les da el nombre de capa-criterio. A las localidades seleccionadas se les definieron los valores para los criterios sociales (número de habitantes por localidad, número de habitantes promedio por vivienda, índice de marginación, red pública de agua potable disponible y presencia de instituciones que fungen de apoyo para la implementación de proyectos sociales) y climatológicos (PMA, número de días con lluvia en el año y radiación solar global), mostradas en la Tabla 1. En caso de no contar con la información tabular correspondiente a la localidad, ésta se obtuvo mediante interpolación espacial. Asimismo, estos criterios se estandarizaron a una escala de valores entre cero y uno para la presente investigación.

La estandarización de los valores de cada criterio se realizó mediante funciones de transformación o mediante la asignación de un valor adimensional. Se utilizó asignación de valores adimensionales para los criterios de índice de marginación (ver Tabla 2), red pública de agua potable disponible, presencia de instituciones que fungen de apoyo para la implementación de proyectos sociales (escuelas, centro de salud y tienda comunitaria) y precipitación media anual. El criterio de red pública de agua potable disponible se obtuvo del censo de población y vivienda, con esta información se buscó favorecer a las localidades en donde no había identificada una red pública de agua potable (valor de 1); por otro lado, con el criterio de presencia de instituciones que fungen de apoyo para la implementación de proyectos sociales se identificaron las localidades con centro de salud y/o escuelas (preescolar,

primaria, secundaria y preparatoria); cabe destacar que para ambos criterios, las localidades cuya información no estuvo disponible se definió un valor de 0.5. Con el criterio de precipitación media anual, se buscó favorecer a las regiones que presentaron una menor precipitación media anual considerando que es ahí donde las necesidades de agua potable son mayores, éstos se muestran en la Tabla 3 y no hay una base técnica que sustente los valores mostrados en la misma.

Tabla 1. Resumen de variables consideradas en el estudio, sus rangos e unidades.

Variable	Rango	Unidades
Índice de marginación (Clasificación CONAPO)	Muy bajo a muy alto	No aplica
Número de habitantes por localidad	51 a 790	habitantes
Número de habitantes promedio por vivienda	3 a 9	habitantes por vivienda
Red pública de agua potable disponible	SI, NO o Sin información disponible	No aplica
Presencia de instituciones para apoyar la implementación social	“No hay” a “Existen tres instituciones”	No aplica
Precipitación media anual	250 a 1650	mm
Número de días con lluvia en el año	32 a 105	días
Radiación Solar Global	5.98 a 6.08	kWh/m ² por día

Tabla 2. Valores estandarizados para el criterio: Índice de Marginación para propósitos de la EMC.

Índice de marginación (Clasificación CONAPO)	Valor
Muy alto	1
Alto	0.75
Medio	0.5
Bajo	0.25
Muy Bajo	0

Tabla 3. Valores estandarizados para el criterio: PMA para propósitos de la EMC.

Rango de PMA	Valor
250 a 500 mm	1
500 a 750 mm	0.8
750 a 1000 mm	0.6
1250 a 1500 mm	0.4
1500 a 1650 mm	0.2

Por otro lado, se utilizaron funciones de transformación para el resto de los criterios, favoreciendo las localidades con más habitantes, mayor número de

habitantes promedio (considerando que la inversión se realizará por vivienda y esto representará beneficiar a una mayor población con una menor inversión), mayor número de días promedio con lluvia y mayor radiación solar diaria. La función de transformación que se utilizó para obtener la escala normalizada de 0 a 1 de cada uno de los criterios se presenta en la ecuación 1.

$$m_i = \frac{x_i - \min.x_i}{\max.x_i - \min.x_i} \quad (1)$$

Dónde, m_i es el valor estandarizado del criterio de priorización i , x_i es el valor a estandarizar, $\min.x_i$ es el valor mínimo de dicho criterio y $\max.x_i$ es el valor máximo del mismo. (Barba-Romero y Pomerol, 1997).

Con los criterios estandarizados, se aplicó la regla de decisión, la cual constituye la superposición de las diferentes capas-criterio en un sólo conjunto de datos. La evaluación o aplicación de la regla de decisión produjo finalmente el modelo de decisión que, para este estudio, correspondió a una jerarquización de las alternativas mediante una Sumatoria Lineal Ponderada (WLP en inglés, Eastman, 2002; Gómez y Barredo, 2006), mediante los valores de capacidad (r_i) más altos. La siguiente expresión (ecuación 2) define el modelo general de capacidad.

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j x_{ij} \quad (2)$$

Dónde, r_i son los valores de capacidad de cada alternativa, w_j es el factor de ponderación para cada criterio j , x_{ij} son las alternativas valoradas en base al criterio j y n es el número de criterios involucrados.

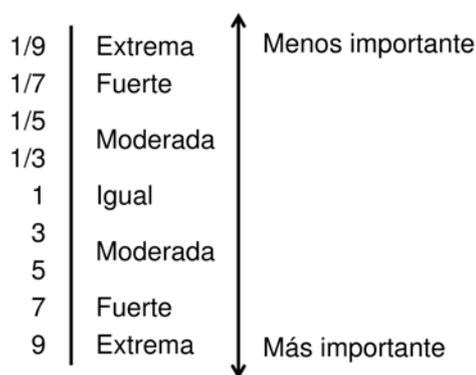


Figura 4. Escala de medida para asignar juicios de valor.

Para definir el factor de ponderación (w_j) para cada criterio, se utilizó el método de comparación de pares de Saaty propuesto en 1977, también conocida como la ponderación eigen-pesos por pares. Para ello, se generó una matriz cuadrada de comparación por pares, presentada en la tabla 4, de los ocho factores y en esta matriz se asignó en cada celda un juicio de valor (a_{ij}), que representa la importancia relativa de cada factor en la columna principal (i) con otros

de la fila principal (j). La escala de medida para la asignación de juicios de valor (a_{ij}), es una escala del tipo continuo (ratios o razón) que va desde un valor mínimo de 1/9 hasta 9 (Saaty, 1980) y se muestra en la Figura 4. Asimismo, en la diagonal solamente se asignaron valores de uno, denotando la igualdad en la comparación de cada factor consigo mismo. Cabe destacar que los juicios de valor asignados se definieron con base a la descripción del problema en el presente estudio.

Una vez asignados los juicios de valor, se calculó el eigenvector principal de la matriz y, posteriormente, se normalizó para obtener los factores de ponderación (w_j) para cada criterio. Para obtener el eigenvector principal de la matriz, primero se normalizaron los valores al obtener el cociente entre cada valor y el valor de la sumatoria de cada columna. Posteriormente, los valores normalizados se sumaron por filas, obteniendo así el eigenvector principal. El cual se normalizó dividiendo entre el número de factores, obteniendo así el eigenvector principal normalizado que representa los pesos (w_j) de cada criterio. Una vez hecho esto, se calculó la consistencia mediante la razón de consistencia ($c.r.$), ver ecuación 3.

$$c.r. = c.i./r.i. \tag{3}$$

Dónde, $c.i.$ es el índice de consistencia, el cual se obtuvo de la siguiente manera: $c.i. = (\lambda_{MAX} - n)/(n - 1)$, siendo λ_{MAX} el valor del eigenvector máximo, obtenido a partir del producto del eigenvector principal normalizado por la matriz de comparación de factores; y n el número de factores en la matriz de comparación. Por otra parte, $r.i.$ es el índice aleatorio (Tabla 5), el cual representa el índice de consistencia de una matriz recíproca generada aleatoriamente a partir de la escala presentada en la Figura 4. En nuestro caso, el índice aleatorio obtenido de la tabla propuesta por Alonso & Lamata (2006) es de 1.4056 para una $n = 8$ (Tabla 5). Fue necesario asegurar un valor de razón de consistencia menor a 0.1, el cual indica que los juicios de valor asignados fueron satisfactorios.

Tabla 4. Matriz de comparación por pares.

FACTOR	HL	HV	IM	RP	IA	PM	DL	RS
HL	1	2	1/3	3	3	1/3	1	1
HV	1/2	1	1/5	2	2	1/5	1/2	1/2
IM	3	5	1	5	5	1	3	2
RP	1/3	1/2	1/5	1	1	1/4	1/2	1/2
IA	1/3	1/2	1/5	1	1	1/5	1/3	1/3
PM	3	5	1	4	5	1	3	2
DL	1	2	1/3	2	3	1/3	1	1
RS	1	2	1/3	2	3	1/2	1	1

Definición de variables: HL = número de habitantes por localidad, HV = número de habitantes promedio por vivienda, IM = índice de marginación, RP = red pública de agua potable disponible, IA = presencia de instituciones para apoyar la implementación social, PM = precipitación media anual, DL = número de días con lluvia en el año y RS = radiación solar.

Tabla 5. Índice aleatorio ($r.i.$) (Alonso & Lamata, 2006)

n	$r.i.$
5	1.1086
6	1.2479
7	1.3417
8	1.4056
9	1.4499
10	1.4854

Una vez estandarizados los valores obtenidos y teniendo los factores de ponderación, se procedió a multiplicar cada factor de ponderación por el valor estandarizado correspondiente a cada criterio, como indica la ecuación 2. Esto ponderó las alternativas y se generó un mapa con los resultados correspondientes, colocando la jerarquización de las comunidades aptas para la implementación de los sistemas de potabilización de agua captada y su desinfección con los colores verde, amarillo y rojas, dividiendo el total de localidades entre cada clase.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Estado de Querétaro existían 2637 localidades rurales de menos de 2500 habitantes, en 2010. De este total, 138 comunidades no contaban con agua potable en ninguna de sus viviendas, lo cual representaba un total de 21426 habitantes que no disponían de agua entubada dentro de la vivienda, o fuera de la vivienda pero dentro del terreno, por lo cual debían satisfacer su necesidad mediante suministro con redes públicas, pipas, pozos, ríos, arroyos, lagos u otro.

Utilizando la “Tabla 4. Matriz de comparación por pares”, se obtuvieron los factores de ponderación para cada uno de los criterios, los cuales se muestran en la Tabla 6. Ésta nos indica que el índice de marginación y la precipitación media anual fueron las variables más importantes, mientras que la presencia de instituciones para apoyar la implementación social las menos relevantes.

Tabla 6. Factores de ponderación para cada criterio.

Criterio	w_j , Factor de ponderación
Número de habitantes por localidad	0.11
Número de habitantes promedio por vivienda	0.06
Índice de marginación	0.26
Red pública de agua potable disponible	0.05
Presencia de instituciones para apoyar la implementación social	0.04
Precipitación Media Anual	0.26
Número de días con lluvia en el año	0.1
Radiación solar	0.12

Utilizando el modelo general de capacidad, presentado en la ecuación 2, se obtuvieron las 138 comunidades rurales en orden jerárquico. La Figura 5 muestra la clasificación de las localidades con mayor a menor valor obtenido en la EMC.

Asimismo, se presenta en la Tabla 6 las cinco localidades prioritarias para implementar desinfección solar de agua de lluvia captada. Éstas cinco comunidades tuvieron un índice de marginación muy alto de acuerdo a la clasificación de la CONAPO, Puerto de la Luz fue la localidad con más habitantes de las cinco presentadas con un total de 439 habitantes, mientras que el valor mínimo lo tuvo La Mesa Providencia con 76 habitantes. Mesa del Castillo (La Fajilla) y Puerto de la Luz tenían 7.7 y 5.5 habitantes en promedio por vivienda, respectivamente, mientras las otras tres localidades tenían valores cercanos a la media, es decir, 4.7 habitantes en promedio por vivienda. Tres de las cinco localidades tenían escuelas o centros de salud en la localidad y no tenían red de agua acorde al Censo de Población del 2010 (la información de este criterio para las localidades Mesa del Castillo (La Fajilla) y La Mesa Providencia no estaba disponible al tener menos de 50 viviendas). La Mesa Providencia fue la localidad que tuvo un menor valor de PMA (296.8 mm) y un mayor valor de irradiación solar global del universo completo de alternativas. Asimismo, las localidades presentan irradiación solar global entre 6.05 y 6.08 kWh/m² por día. Las localidades Puerto de la Luz y Ocotitlán, de ambos municipios, tuvieron 882.0 mm de PMA y 93.9 días con lluvia en promedio, mientras que Mesa del Castillo (La Fajilla) tuvo una PMA de 634.6 mm y 77.5 días con lluvia en promedio.

Tabla 6. Localidades prioritarias para implementar desinfección solar de agua de lluvia captada al aplicar la EMC.

Clave	Localidad	Municipio	Total
220040086	Puerto de la Luz	Cadereyta de Montes	0.7397
220040070	Ocotitlán	Cadereyta de Montes	0.7354
220040066	Mesa del Castillo (La Fajilla)	Cadereyta de Montes	0.7301
220040065	La Mesa Providencia	Cadereyta de Montes	0.7100
220150097	Ocotitlán	San Joaquín	0.7026

4. CONCLUSIONES

La evaluación multicriterio permitió trabajar capas de información (criterios) de manera separada, para después evaluarlas como un todo y cumplir con el objetivo planeado, el cual era identificar y priorizar las localidades con mayor potencial para la implementación de desinfección solar que no cuentan con agua potable en ninguna de sus viviendas. Esto

arrojó un listado de todas las alternativas en orden de prioridad que se puede observar en la Figura 5.

Para esta investigación se seleccionaron (por disponibilidad de la información y decisión basada en el marco teórico planteado) los criterios: número de habitantes por localidad, número de habitantes promedio por vivienda, índice de marginación, red pública de agua potable disponible, presencia de instituciones que fungen de apoyo para la implementación de proyectos sociales, PMA, número de días con lluvia en el año y radiación solar global; sin embargo, de haber más información respecto a fuentes de agua y su calidad, contaminación atmosférica y condiciones socioeconómicas de la población, se podría realizar un análisis más detallado.

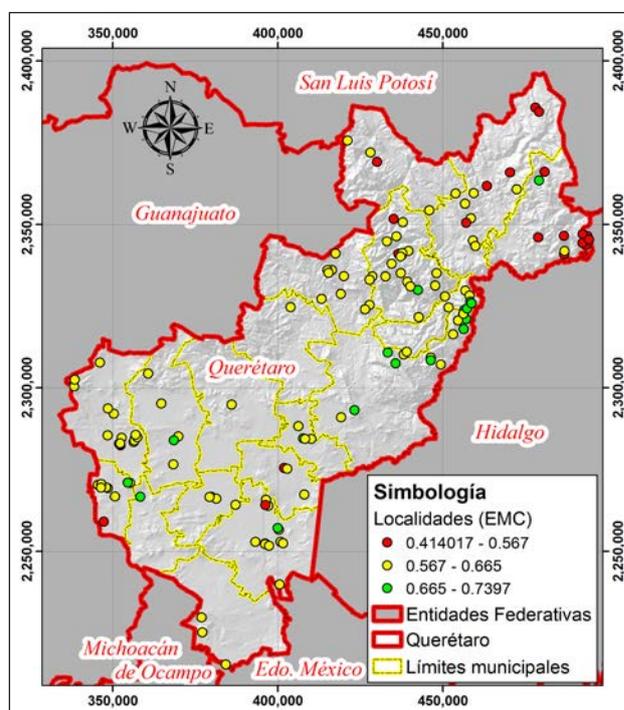


Figura 5. Mapa con los resultados de la evaluación multicriterio.

Por otro lado, previo a la implementación de este proyecto de captación pluvial y desinfección solar de la misma, será necesario un recorrido en campo para identificar que las condiciones obtenidas del Censo de Población y Vivienda 2010 aún existan en las localidades, identificar si no tienen proyectos en proceso de implementación que solucionen la falta de agua potable para beber, si existen actores adicionales como Organismos No Gubernamentales implementando proyectos y la disposición de la población para utilizar el agua proveniente de lluvia para consumirla.

Asimismo, se recomienda que para posteriores investigaciones utilizando información proveniente del INEGI (cuyo criterio de discretización entre localidades rurales y urbanas son número de habitantes en una superficie de 100 km²), se

considere que la contaminación presente en localidades cercanas a las zonas urbanas será diferente a aquellas que se encuentran más alejadas de las mismas. Para lo cual se podría incluir un criterio adicional que es cercanía a las zonas urbanas. Esto nos permitiría incluir en la evaluación este factor y así diferenciar las localidades cercanas de las alejadas geográficamente.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo de beca para realizar los estudios de posgrado que generaron el conocimiento para realizar la investigación presentada. Asimismo, a la Dirección de Vinculación Tecnológica y Proyectos Especiales que forma parte de la Secretaría de Extensión Universitaria de la Universidad Autónoma de Querétaro, por su apoyo a través del financiamiento de proyectos de investigación en el tema de desinfección solar de agua de lluvia captada.

BIBLIOGRAFÍA

Ahammed, M. M. & V. Meera. 2006. Iron hydroxide-coated sand filter for household drinking water from roof-harvested rainwater. *Journal of Water Supply: Research & Technology – Aqua*. 55 (7-8): 493-498.

Alonso, J.A. & M.T. Lamata. 2006. Consistency in the Analytic Hierarchy Process: A New Approach. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*. 14 (4): 445-459.

Anaya, M. & J. J. Martínez. 2007. Manual sobre sistemas de captación y aprovechamiento de agua de lluvia para uso doméstico y consumo humano. 1ª ed. Colegio de Postgraduados, Estado de México, México.

Barba-Romero, S. & J. C. Pomerol. 1997. Decisiones multicriterio: Fundamentos teóricos y utilización práctica. Colección de Economía. Universidad de Alcalá. Madrid. 420 pp.

Bosshard, F., K. Riedel, T. Schneider, C. Geiser, M. Bucheli & T. Egli. 2010. Protein oxidation and aggregation in UVA-irradiated *Escherichia coli* cells as signs of accelerated cellular senescence. *Environ. Microbiol.* 1-15.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2007. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Distrito Federal, México.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2014. Estadísticas del agua en México, edición 2013. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Distrito Federal, México.

De la Vega E., S., Y. Tellez V. & J. López R. 2012. Índice de marginación por localidad 2010. Consejo Nacional de Población, México, D.F. pp. 342.

Eastman, R. 2002. IDRISI Version 4.0 User's Guide. Clark University Graduate School of Geography, Worcester, MA.

Environmental Systems Research Institute (ESRI). 2008. What is ArcGIS 9.3? ESRI, California, Estados Unidos.

Gerencia de Energías No Convencionales. 2010. Mapas de Irradiación Solar. Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, Morelos. Disponible en línea: <http://sag01.iie.org.mx/eolicosolar/default.aspx>. Accesada el 27 de septiembre de 2013.

Gómez D., M. & J. I. Barredo C. 2006. Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. 2ª Ed. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2011. Principales resultados por localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2010. México, D.F.

Jordan, F.L., R. Seaman, J.J. Riley & M.R. Yoklic. 2008. Effective removal of microbial contamination from harvested rainwater using a simple point of use filtration and UV-disinfection device. *Urban Water J.* 5 (3): 209-218.

Naciones Unidas (ONU). 2014. Objetivos de Desarrollo del Milenio: Informe de 2014. Nueva York. Pp. 56.

Saaty, T. L. 1980. The analytic hierarchy process. McGraw-Hill. New York. USA. 269 p.

Servicio Meteorológico Nacional. 2012. Climatología: Normales Climatológicas del periodo 1981-2010 y Estadística Descriptiva por estación. Disponible en línea: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=177:queretaro&catid=14&Itemid=2. Accesada el 30 de octubre del 2013.

Solarte, Y., M. L. Salas, B. Sommer, C. Dierolf & M. Wegelin. 1997. Uso de la radiación solar (UV-A y temperatura) en la inactivación del *Vibrio cholerae* en agua para consumo humano. Factores que condicionan la eficiencia del proceso. *Colombia Médica* 28 (003): 123-129.

Villalazo Peña, P, J. P. Corona Medina & S. García Mora. 2002. Urbano – Rural, constante búsqueda de fronteras conceptuales. Notas, Revista de Información y Análisis. INEGI, México D. F. 20: 17 – 24.