

# Captación de agua de lluvia como alternativa para uso en agricultura urbana

## *Rainwater harvesting as an alternative for use in urban agriculture*

DOI: <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i11.197>

**RODRIGO ROBLERO HIDALGO**

<https://orcid.org/0000-0001-6361-8084> / [rodrigo-roblero@hotmail.com](mailto:rodrigo-roblero@hotmail.com)

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México

**JORGE FLORES VELÁZQUEZ**

<https://orcid.org/0000-0003-0895-4645> / [jorgelv@colpos.mx](mailto:jorgelv@colpos.mx)

Colegio de Postgraduados, México

Recepción: 11 de septiembre de 2021. Aceptación: 08 de noviembre de 2021.

### RESUMEN

El incremento de urbes pobladas y los actuales sistemas de drenaje potencializan la captación de agua de lluvia y su uso en agricultura urbana. El objetivo de este trabajo fue generar una metodología para estimar el volumen de captación de agua de lluvia para uso en agricultura urbana. Se estimó la superficie de dos techos urbanos con características contrastantes mediante imágenes obtenidas de la cámara transportada en un VANT. Se genera un modelo digital de superficie (MDS) y se identificaron los coeficientes de escurrimiento por subárea de captación. Con las normales climatológicas se calculó la precipitación media mensual. Se calculó el volumen de captación de agua de lluvia y se analizó su uso en el cultivo de lechuga. Los valores obtenidos de la estimación del volumen de lluvia a partir de las áreas de captación obtenidas del MDS y datos meteorológicos, permitió el análisis agronómico del cultivo.

Palabras clave: Coeficiente de escurrimiento, volumen de agua de lluvia, VANT, lechuga

### ABSTRACT

The increase in populated cities and the current drainage systems enhance the capture of rainwater and its use in urban agriculture. The objective of this work was to generate a methodology to estimate the volume of rainwater catchment for use in urban agriculture. The surface of two urban roofs with contrasting characteristics was estimated using images obtained from the camera transported in a UAV. A digital surface model (MDS) is generated and the runoff coefficients by catchment subarea were identified. With the climatological normals, the average monthly precipitation is calculated. The volume of rainwater catchment is calculated and its use in lettuce cultivation is analyzed. The values obtained from the estimation of the rainfall volume from the catchment areas obtained from the MDS and meteorological data, allowed the agronomic analysis of the crop.

Keywords: Runoff coefficient, volume of rainwater, UAV, lettuce



## INTRODUCCIÓN

Los humanos aprovechan el agua superficial como fuente primaria para satisfacer sus necesidades diversas, que van desde su consumo directo hasta su aprovechamiento como vía de transporte, por ello las primeras civilizaciones se establecieron a orillas de los ríos; con el descubrimiento de la agricultura, el hombre aprendió a valorar la lluvia; pero no dependía únicamente de ella para su supervivencia, debido a la presencia permanente del agua superficial. El crecimiento demográfico de las civilizaciones promovió el establecimiento de pueblos en zonas áridas o semiáridas, en las cuales la captación de agua de lluvia fue indispensable para el riego de cultivos y el consumo doméstico.

Existen variantes de captación del agua de lluvia (Mekdaschi-Studer y Liniger, 2013) y ejemplos ancestrales de su uso para consumo humano y riego, que incluyen obras realizadas en el desierto del Negev, en Israel y Jordania (2000 a.C.), Yemen (1000 a.C.), Roma (siglos III y IV a.C.), Yucatán, México (siglo X a.C.), Cerros, Belice (año 200 d.C.) y Campeche, México en la época precolombina (Martínez-Saldaña et al., 2011). Las experiencias internacionales actuales también demuestran que los sistemas de captación de agua de lluvia son una solución a la creciente escasez de agua en zonas rurales y urbanas, por lo que su estudio cada vez es más relevante a nivel mundial y en las dos últimas décadas los países que lideran la investigación al respecto son India, China, USA, Sudafrica y Holanda (Velasco-Muñoz et al., 2019).

Entre los estudios que se han llevado a cabo en cuencas hidrográficas están los reportados por Linsley, Kohler, y Paulus (1977), Chereque-Morán (1989), Aparicio-Mirajes (1992), Martínez-Menes et al. (2010) y Fattorelli y Fernández (2011). En relación a estudios sobre captación de lluvia con fines específicos se pueden mencionar: procesamiento en un beneficio de café (Méndez-Cubillo, 2016); almacenamiento y conservación en depresiones de terrenos para producción agrícola (Critchley y Siegert 1991; FAO, 2014; Mek-

daschi-Studer y Liniger, 2013); conservación para irrigación de cultivos mediante pequeñas obras (Critchley, Siegert, y Chapman 1991); abastecimiento para el hogar (Basán-Nickisch et al., 2018; Morales-Pinzón, 2012; Zunun-Bartolome, 2009); purificación y embotellamiento para consumo humano (Pérez-Hernández et al. 2018). Estudios específicos sobre el costo beneficio del uso de agua de lluvia para cultivos extensivos (Ghimire y Johnston, 2019).

Hay escasas de iniciativas para el uso del agua de lluvia en la agricultura urbana (Amos, Rahman, y Gathenya, 2018), posiblemente debido a la falta de estudios básicos para conocer la cantidad real de agua de lluvia que puede ser captada en lugar de dejarla correr al drenaje, especialmente en países en vías de desarrollo. La importancia de la agricultura urbana y la captación de agua de lluvia para tal fin ha sido documentada en países desarrollados como EEUU (Parece, Lumpkin, y Campbell, 2016), Australia (Amos, Rahman, Karim, et al., 2018) e Italia (Lupia et al., 2017).

El estado del arte en el tema en México incluye el estudio en zonas rurales y urbanas de los factores que afectan el diseño y adopción de los sistemas de captación: ambiental, social, económico, adopción (Salinas-Hernández, 2015) y técnico (UNATSABAR, 2001). Asimismo, en la literatura se encuentran manuales de captación que incluyen la construcción de tanques (Caballero-Aquino, 2006) y cisternas con ferrocemento. En comunidades marginadas de zonas áridas, la captación de lluvia podría ser parte de un modelo de desarrollo integral rural para producción agrícola y uso doméstico (Pedroza-Sandoval et al. 2014). En el estudio de costo beneficio de la captación de agua de lluvia en la ciudad de Morelia, se estimó un ahorro del 1 al 3% por la disminución del bombeo para el suministro del agua (Arroyo-Zambrano, 2013). Otro análisis realizado para casas de interés social, que consideró el índice energético, hídrico, social, económico y urbanístico, reveló que la cosecha de lluvia aportaría el 20% del requerimiento hídrico (Ortiz-Moreno, Arroyo-Zambrano, y Fuentes-Gutiérrez, 2015).

El agua de lluvia en la agricultura urbana presenta las siguientes ventajas principales (OPS et al., 2004): alta calidad físico química (Isla urbana, 2017); su captación se puede lograr en estructuras dispersas y alejadas entre sí; su uso genera empleo de mano de obra; su captación no requiere energía; bajo costo de mantenimiento durante su almacenamiento. Entre sus desventajas, (OPS et al., 2004) indica: alto costo inicial del acondicionamiento del área de captación y almacenamiento; el volumen cosechado depende de la precipitación pluvial y del área de captación; el espacio de captación por habitante es reducido en las zonas urbanas.

Morales-Pinzón (2012) integra información de varias ciudades del mundo relevante para la captación y el uso en el hogar del agua de lluvia, que aporta elementos valiosos que pueden ser adaptados para usar dicha agua en agricultura urbana, ya que genera un modelo matemático de la demanda de acuerdo a los usos de agua en el hogar, calcula el potencial de lluvia en una subcuenca y el volumen almacenado, y considera la dureza del agua para los análisis ambientales y económicos respectivos.

En el aprovechamiento del agua de lluvia para agricultura urbana, es indispensable estimar el potencial de cosecha de lluvia en función de los espacios disponibles para su captación. Los métodos actuales dimensionan y tipifican las áreas de captación de forma manual. En este contexto el desarrollo de modelos y metodologías para la implementación de la cosecha de agua cada día es más relevante (Rahman, 2017). Por ello el objetivo del presente estudio es generar un ortomosaico y un modelo digital de superficie con el apoyo de un dron, que caracterice la superficie de techos urbanos, de utilidad en la estimación del volumen de lluvia cosechada con fines de uso en agricultura urbana.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en Jiutepec, Morelos, usando como áreas de captación los techos de dos edificios, figura 1, pertenecientes al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Los equipos y materiales usados fueron: VANT DJI Phantom 4 pro, cámara digital, figura 2, compu-

**FIGURA 1**

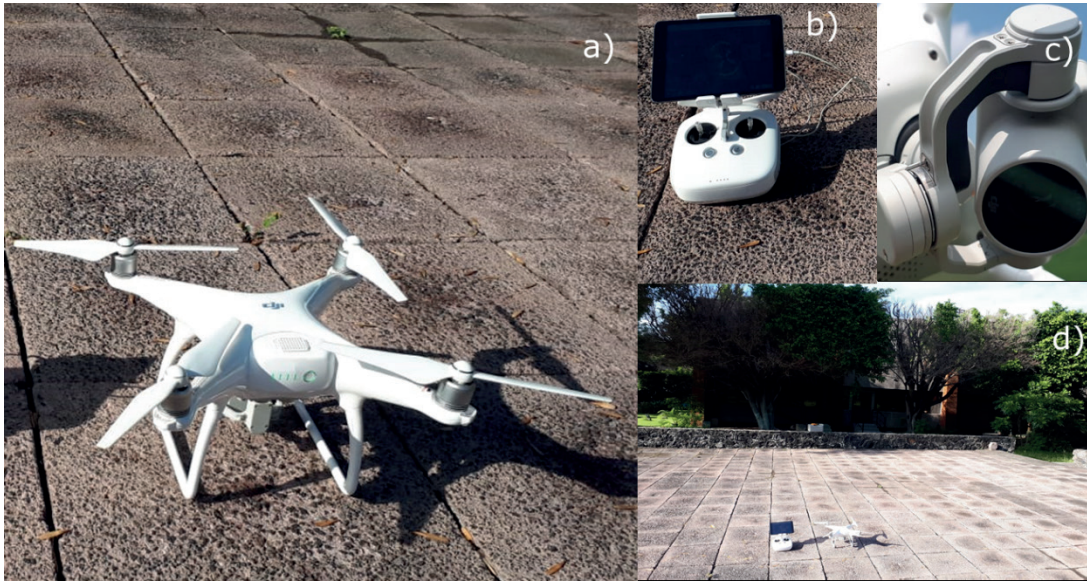
Ubicación de los edificios A1 y 2 del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua





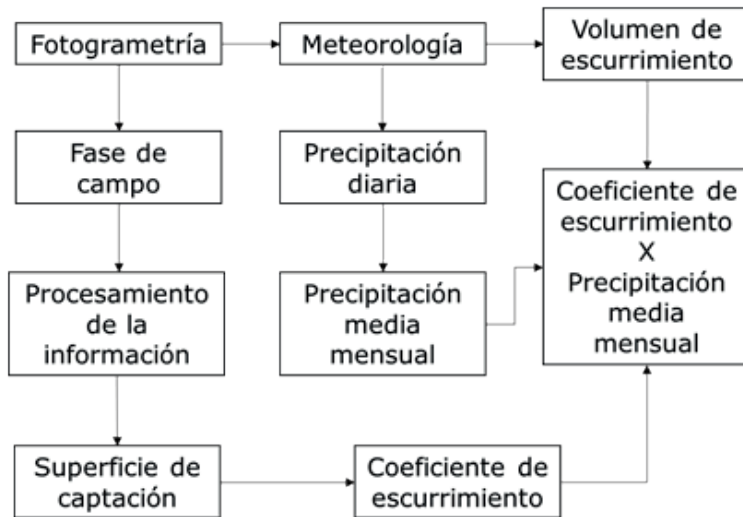
**FIGURA 2**

Dron (a), control (b), carga útil (c) y zona de despegue (d).



**FIGURA 3**

Metodología para determinar el volumen de escurrimiento para captación de agua de lluvia en agricultura urbana.



tadora y software, flexómetro y cinta de 100 m. El diagrama metodológico para cumplir el objetivo planteado se presenta en la figura 3.

## FOTOGRAMETRÍA

La fase de campo consistió en la obtención de imágenes digitales y longitudes, éstas con mediciones manuales (control), de las aristas de las

azoteas de los edificios, figura 4. Con la cámara acoplada al VANT volando a 30 m de altura se obtuvieron 39 (187 Mb) y 52 (278 Mb) imágenes con resolución de 0.82 cm por pixel de los techos A1 y 2, respectivamente. Las fotografías fueron obtenidas con 80% de traslape. Para el primer techo, el equipo sobrevoló el área equivalente a 42 m x 80 m, con un recorrido total de 314 m, distribuido en 4 líneas de vuelo, en un tiempo de vuelo de 3'40". En el otro techo, el dron cubrió el

área equivalente a 57 m x 97 m con una trayectoria de 784 m, distribuida en 5 líneas, en un tiempo de vuelo de 4'33".

Se usó el software Agisoft Metashape Pro versión 1.5 de prueba (Agisoft LLC 2019) para el procesamiento de imágenes, obtención del ortomosaico y generación del modelo digital de superficie (MDS) georreferenciado en UTM 14N, con el cual se estimaron las longitudes de las aristas de las azoteas. Con estos datos se calculó el área de captación de cada azotea.

### METEOROLOGÍA

Los datos de precipitación diaria usados en el presente estudio corresponden a la estación meteorológica con clave 17071 denominada Progreso IMTA, que se encuentra en las instalaciones del IMTA, con coordenadas (X= 99° 9'31"O, Y= 18°53'04"N, Z= 1,372.2 msnm). Se generó la base de datos con la lluvia del periodo de 05/01/1982 al 22/05/2019 obtenida de SMN (2017) y del registro de la estación meteorológica (2017-2019).

Las ecuaciones (1 a 5) usadas en el análisis de la precipitación (Chávez 2010), para conocer la precipitación media mensual y anual, se presentan a continuación:

Precipitación mensual del año k:

$$Pr_{jk} = \sum_{i=1}^{NDM_j} Pr_{ijk} \quad 1$$

Precipitación anual del año k:

$$Pr_k = \sum_{j=1}^{12} Pr_{ijk} \quad 2$$

Precipitación media mensual, mes j:

$$\overline{Pr}_j = \frac{\sum_{k=1}^{NAR} Pr_{jk}}{NAR} \quad 3$$

Precipitación promedio mensual:

$$\overline{Pr} = \frac{\sum_{j=1}^{12} \overline{Pr}_j}{12} \quad 4$$

Precipitación media anual:

$$\overline{Pr}_{anual} = \frac{\sum_{k=1}^{NAR} Pr_k}{NAR} \quad 5$$

Donde:

$Pr_{ijk}$  = Precipitación del día i del mes j, año k, en mm.

$i$  = Número del día del mes j ( $i = 1, 2, 3, \dots, NDM_j$ ).

$j$  = Número de mes ( $j = 1, 2, 3, \dots, 12$ ).

$k$  = Número de año ( $k = 1, 2, 3, \dots, NAR$ ).

$NDM_j$  = Número de días del mes j (28, 29, 30 ó 31).

$NAR$  = Número de años de registro.

La disponibilidad de precipitación, media mensual y anual, se calculó con base en FAO (2014) y Pizarro et al. (2015).

FIGURA 4

Medición manual *in situ* (a) y ortomosaico asistido con dron (b).



## COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO

El volumen de escorrentía puede ser menor al volumen de lluvia en función de las características de la superficie y de la precipitación. El valor que resulta al comparar dichos valores se llama coeficiente de escurrimiento, el cual se determina con la ecuación 6 (Monsalve-Sáenz, 1995; Breña-Puyol y Jacobo-Villa, 2006; Martínez de Azagra-Paredes, 2006; FAO, 2013).

$$Ce = \frac{E}{P} \quad 6$$

Donde:

Ce= Coeficiente de escurrimiento, adimensional o a 1.

E= Escurrimiento expresado en lámina, mm.

P= Precipitación, mm.

Los valores del Ce varía de 0 y 1 indicando que toda la precipitación es retenida en el área de captación y que toda la precipitación es escorrentía, respectivamente (Martínez de Azagra-Paredes, 2006).

Los valores del coeficiente de escurrimiento son producto de diversos factores como: tipo (lluvia, nieve o granizo), cantidad, intensidad y distribución de precipitación en el tiempo; humedad inicial de la superficie; tipo de terreno (granulometría, textura, estructura, material, grado de compactación, pendiente, relieve, rugosidad); intercepción producida por la cubierta vegetal; lapso de tiempo (minutos, horas, días, meses, año). En este caso la cantidad de lluvia y tipo de terreno (material del techo) son importantes con el objetivo de captar agua de lluvia en las azoteas. En el cuadro 1 se presentan los Ce para captación de agua de lluvia para diferentes superficies de azoteas con base en diferentes fuentes.

En el presente estudio, se usó el coeficiente de escurrimiento promedio ponderado (Fattorelli y Fernández, 2011) y (Breña-Puyol y Jacobo-Villa, 2006), con base en los Ce que más se utilizan en la estimación de la captación de agua de lluvia, cuadro 1.

A partir de cada subárea y su coeficiente de escurrimiento, asignado con base en el cuadro 1, se determinó el coeficiente de escurrimiento ponderado (Campos-Aranda, 2010; SCT, 2000; Chow, Maidment, y Mays, 1994; Breña-Puyol y Jacobo-Villa, 2006) con la ecuación 10.

$$Ce = \frac{\sum_{i=1}^n Ce_i * a_i}{A} \quad 10$$

Donde:

Ce = Coeficiente de escurrimiento ponderado, adimensional o a 1.

Ce<sub>i</sub> = Coeficiente de escurrimiento del área individual, adimensional o a 1.

a<sub>i</sub> = Área individual, m<sup>2</sup>.

A = Área total de la superficie de captación, m<sup>2</sup>.

n = Número de áreas individuales consideradas, entero positivo consecutivo 1, 2, ...

## VOLUMEN DE ESCURRIMIENTO

Para calcular el volumen potencial de escurrimiento (captación de agua de lluvia), se usó la ecuación 11.

$$V_{jk} = Ce_{ponderado} * A_{Total} * Pm \quad 11$$

Donde:

V<sub>jk</sub> = Volumen medio mensual potencial a captar, m<sup>3</sup>.

Ce<sub>ponderado</sub> = Coeficiente de escurrimiento ponderado, adimensional.

A<sub>Total</sub> = Área total de captación, m<sup>2</sup>.

Pm = Precipitación media mensual, m.

## RESULTADOS

### ÁREAS DE CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA

Con el MDS se determinaron las longitudes de las aristas de los techos y se compararon con las determinadas mediante el procedimiento manual. Se observó que las diferencia entre valores generados por ambos métodos es muy cercana a cero, cuadro 2.



**CUADRO 1**

Coeficientes de escurrimiento para captación de agua de lluvia

Superficie	Coeficiente*	Fuente
Concreto	0.6-0.9	(CONAGUA, 2016)
Pavimento	0.5-0.6	(Pizarro et al., 2015)
Geomembrana (PVC)	0.85-0.95	(CONAGUA, 2016)
Azulejos, teja	0.8-0.9	(CONAGUA, 2016), (OPS et al., 2003), (Solano et al., 2017)
Lámina acanalada	0.7-0.9	(CONAGUA, 2016), (OPS et al., 2003), (Solano et al., 2017)
Calles asfaltadas	0.85	(SE, 2013)
Adoquinado o empedrado con cemento	0.75	(SE, 2013)
Terrazas	0.6	(SE, 2013)
Adoquín sin juntear	0.6	(SE, 2013)
Terracerías	0.4	(SE, 2013)
Tejado duro inclinado	0.8	(ESPA, 2002), (Lluís-Huguet et al., 2016)
Tejado plano sin gravilla	0.8	(ESPA, 2002), (Lluís-Huguet et al., 2016)
Tejado plano con gravilla	0.6	(ESPA, 2002), (Lluís-Huguet et al., 2016)
Tejado verde intensivo	0.3	(ESPA, 2002), (Lluís-Huguet et al., 2016)
Tejado verde extensivo	0.5	(ESPA, 2002), (Lluís-Huguet et al., 2016)
Superficie empedrada/superfici con empedrado compuesto	0.5	(ESPA, 2002), (Lluís-Huguet et al., 2016)
Revestimiento asfáltico	0.8	(ESPA, 2002), (Lluís-Huguet et al., 2016)
Madera	0.8-0.9	(OPS et al., 2003), (Solano et al., 2017)
Paja	0.6-0.7	(OPS et al., 2003), (Solano et al., 2017)

\*(ESPA, 2002) usa el nombre de coeficiente de rendimiento de la superficie de captación.

**CUADRO 2**

Longitudes de las aristas de las azoteas de dos edificios obtenidas con dos métodos.

N <sup>o</sup>	A1 (Anexo 1)				2 (Riego y drenaje)			
	Manual	MDS	Ubicación	Dif*	Manual	MDS	Ubicación	Dif*
	m			m	m			m
1	51.17	51.00	oeste	0.17	12.80	12.90	este	-0.10
2	6.30	6.40	sur	-0.10	15.50	15.60	norte	-0.10
3	29.30	29.40	este	-0.10	1.78	1.79	oeste	-0.01
4	3.20	3.10	sur	0.10	28.68	28.80	norte	-0.12
5	7.30	7.14	este	0.16	12.80	12.80	oeste	0.00
6	8.00	7.96	sur	0.04	30.26	30.40	sur	-0.14
7	2.10	2.21	oeste	-0.11	1.95	1.87	este	0.08
8	14.40	14.20	sur	0.20	14.00	14.00	sur	0.00
9	6.50	6.55	este	-0.05	4.64	4.58	Cuarto de máquinas, sur	0.06
10	14.00	14.10	norte	-0.10	7.40	7.46	Cuarto de máquinas, este	-0.06
11	1.70	1.68	oeste	0.02	4.32	4.35	Distancia entre puntos 6 y 10	-0.03
12	11.50	11.50	norte	0.00	2.74	2.75	Cuarto de tanque de agua, este	-0.01
13	13.30	13.30	oeste	0.00	4.16	4.20	Cuarto de tanque de agua, sur	-0.04
14	5.10	5.05	norte	0.05				

\*Dif, Diferencia = valor Manual – valor MDS

La comparación estadística entre las longitudes obtenidas manualmente y con el modelo digital de superficie indicó que, éste último generó estadísticamente las mismas longitudes que el procedimiento manual, Figura 5. Con base en este resultado, el modelo digital de superficie se usó para estimar superficies en cada uno de los techos, cuya heterogeneidad de la superficie se debió al tipo de material con que fueron construidas o recubiertas. Los valores obtenidos se presentan en el cuadro 3.

### DISTRIBUCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN

La distribución de la precipitación en el área de estudio, se determinó para un periodo de retorno

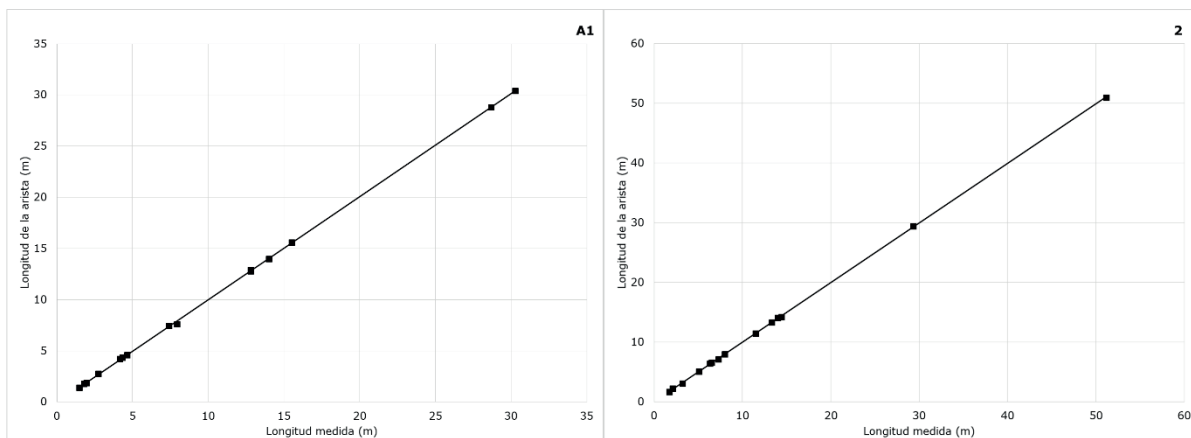
de 2 años, figura 6, la cual también muestra tres épocas de lluvia conocidas como seca, húmeda y sequía intraestival, que ocurren en noviembre-abril, mayo-octubre y junio-septiembre, respectivamente. El promedio de precipitación del periodo húmedo (1056 mm) es superior al promedio nacional de 740 mm (CONAGUA, 2018).

### VOLUMEN DE ESCURRIMIENTO

Además de conocer el área de captación y la precipitación disponible, fue indispensable determinar y asignar un valor de  $C_e$  para cada subárea de la azotea de cada edificio, cuadro 4. Los cuadros 4 y 5 muestran que los techos de ambos edificios usados en el presente estudio son contrastantes

FIGURA 5

Comparación de las longitudes de las aristas de los edificios (A1 y 2) obtenidas manualmente y con el modelo digital de superficie.



Edificio	Modelo	Bo	B1	R <sup>2</sup>	CV, %	n
A1	$Y_{A1} = B_0 + B_1X$	0.00559	0.99794	0.99	0.87	14
	Pr > F: <.0001	0.8914	<.0001			
2	$Y_2 = B_0 + B_1X$	-0.02071	1.00524	1.0	0.42	13
	Pr > F: <.0001	0.3149	<.0001			

CUADRO 3

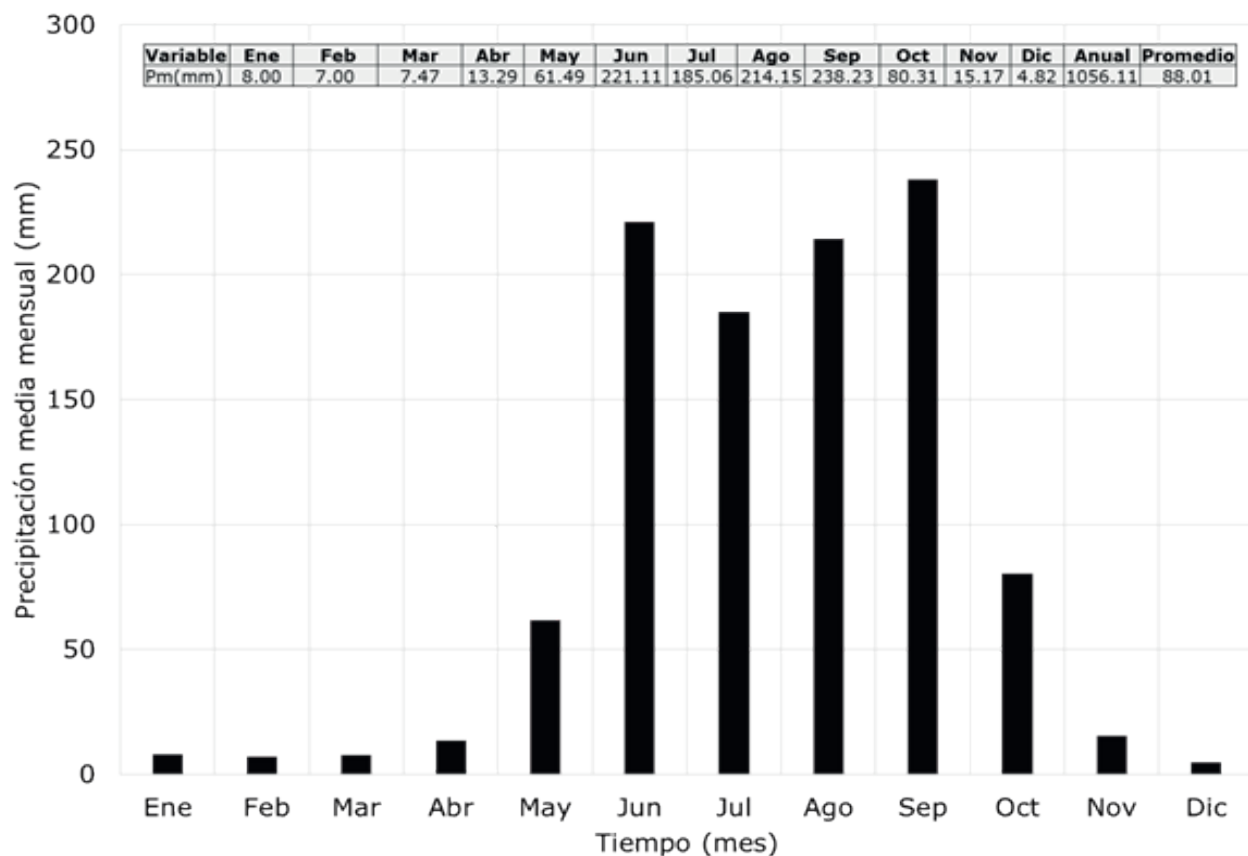
Subáreas determinadas en los techos de los edificios.

Subárea	Unidades	A1 (Anexo 1)		2 (Riego y drenaje)	
A <sub>1</sub>	m <sup>2</sup>	12.00	Tragaluz de policarbonato	38.77	Lámina acanalada
A <sub>2</sub>		454.06	Superficie revestida de impermeabilizante rojo	11.97	Concreto
A <sub>3</sub>				521.21	Superficie revestida de impermeabilizante rojo
A <sub>Total</sub>		466.06		571.95	



**FIGURA 6**

Precipitación media mensual en la estación meteorológica 17071-Progreso



en su tamaño y  $C_e$ . Esta situación es importante ya que la presente metodología pretende ser útil para los diferentes techos, con los cuales se pueden contar en un proyecto de captación de agua de lluvia para diferentes usos en zonas urbanas.

El volumen de escurrimiento se calculó a partir del área total de captación de cada edificio ( $A_1=466.06 \text{ m}^2$  y  $2=571.95 \text{ m}^2$ ) multiplicada por su coeficiente de escurrimiento ponderado (0.8) y la lámina de agua de lluvia. Los volúmenes de cap-

tación de agua de lluvia, obtenidos para un periodo de retorno de 2 años, se presentan en el cuadro 4 y figura 7. En esta se aprecia que los meses con menor volumen cosechado de agua son noviembre-abril, que corresponden a la época seca, y los meses con mayor volumen de captación de agua son mayo-octubre, correspondientes a la época húmeda. Esta tendencia es coincidente con la precipitación mensual que se presentó en la figura 6.

**CUADRO 4**

Coeficiente de escurrimiento asignado a cada subárea del techo de los edificios.

Subárea y $C_e$	A1 (Anexo 1)		2 (Riego y drenaje)	
A1	0.90	Tragaluz de policarbonato	0.90	Lámina acanalada
A2	0.80	Superficie revestid	0.70	Concreto
A3			0.80	Superficie revestid
$C_{e\text{ponderado}}$	0.80		0.80	
$A_{\text{Total}}$	466.06		571.95	

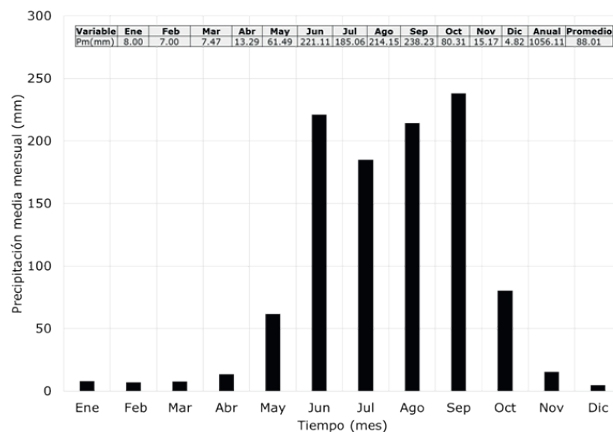
**CUADRO 5**

Precipitación y volumen mensual de agua cosechada en las áreas de captación de los edificios A1 (Anexo 1) y 2 (Riego y drenaje).

Mes	Precipitación*		A1	2
	mm	m		
	m <sup>3</sup>			
Enero	8.00	0.01	2.99	3.68
Febrero	7.00	0.01	2.62	3.22
Marzo	7.47	0.01	2.79	3.44
Abril	13.29	0.01	4.97	6.12
Mayo	61.49	0.06	23.00	28.30
Junio	221.11	0.22	82.71	101.76
Julio	185.06	0.19	69.22	85.17
Agosto	214.15	0.21	80.10	98.56
Septiembre	238.23	0.24	89.11	109.64
Octubre	80.31	0.08	30.04	36.96
Noviembre	15.17	0.02	5.67	6.98
Diciembre	4.82	0.00	1.80	2.22
Anual	1,056.11	1.06	395.04	486.07
Media mensual	88.01	0.09	32.92	40.51

**FIGURA 7**

Escurrimiento medio mensual para captación de agua de lluvia, en los edificios A1 y 2.



Con la cuantificación del volumen potencial de agua de lluvia distribuida durante el año es posible calcular la capacidad de almacenamiento de agua necesaria para diferentes usos, tales como riego de plantas, uso doméstico, uso industrial y consumo humano, entre otros.

La aplicación de la presente metodología basada en la generación de un modelo digital de superficie para calcular el área y características de los techos urbanos como área de captación de

agua de lluvia es una innovación. Otros estudios se han focalizado en la generación de modelos digitales con información colectada mediante imágenes LIDAR para el cálculo de áreas y caracterización de techos en la instalación de sistemas fotovoltaicos (Palmer et al., 2018), en la medición de áreas con sombra de las techumbres con el fin de estimar la superficie disponible para captar la energía solar (Yousuf, Siddiqui y Rehman, 2018) y en la caracterización de ellos mediante aprendizaje máquina (machine learning) (Mohajeri et al., 2018). Asimismo, se han realizado modelos digitales de superficie para fines catastrales (Fontalvo-Jaraba et al., 2018).

La información para calcular áreas de techos urbanos para cosechar agua como insumo para agricultura urbana es escasa. Por ello, la metodología propuesta a partir de la generación de un modelo digital de superficie para identificar sus características relacionadas con el coeficiente de escurrimiento y estimar el área de captación, así como el volumen potencial disponible, con base en el análisis meteorológico, adquiere relevancia ante la demanda creciente de alimentos (Lupia et al., 2017).

La planeación de producción ininterrumpida de cultivos es considerada una ventaja de la agricultura urbana (de Anda y Shear, 2017). Para probar este propósito es necesario primero contar con datos básicos del requerimiento hídrico del cultivo. En el presente estudio se complementan los resultados de la presente investigación mediante su aplicación al cultivo de lechuga.

La lámina de lluvia mensual oscila de 0.4 a 23.8 cm durante el año, con un promedio anual de 8.8 cm. En condiciones de invernadero, el consumo hídrico de la lechuga varía de 0.8 l día<sup>-1</sup> en otoño (Defilipis et al., 2006), hasta casi 2 l día<sup>-1</sup> en primavera. En cultivo de esta especie requiere 8 cm de lámina de riego por ciclo (Escarabajal-Henarejos et al., 2015). En hidroponía y con recirculación de agua dicho requerimiento puede disminuir 20 % (Barbosa et al., 2015).

Para el cultivo de ornamentales, principalmente *sedum spp.* donde el consumo fue estimado en 0.9 mm diarios (Flores-Velázquez, Rojano y Aguilar,

2019) el volumen de captación de agua de lluvia es suficiente para mantener siempre el riego.

El volumen de agua de lluvia disponible, captada en ambos edificios, puede aplicarse de acuerdo a las condiciones de cultivo y distribución de la precipitación: a). a campo abierto, en la época de estiaje; b). en invernadero, durante un ciclo. c). en hidroponía, de manera continua en el año. En cualquiera de estas situaciones es importante considerar el almacenamiento del agua de lluvia.

Es importante diferenciar el periodo húmedo (mayo-octubre), ya que en este se puede obtener el mayor potencial de producción; y considerar que en el periodo seco (noviembre-abril) es menor y dependería del almacenamiento. Ambos casos son una limitante ya que en ambos casos depende de la precipitación, poniéndola en la misma condición que en la agricultura de temporal; sin embargo, con las estructuras de almacenamiento permitirían amortiguar el estrés hídrico, es por ello que la relación del volumen del almacenamiento es la función óptima y estará sujeta a la demanda.

El volumen potencial de agua cosechada en el lugar de estudio requiere de una cisterna con capacidad de 395.04 m<sup>3</sup> para el edificio A1 y de 486.07 m<sup>3</sup> para el edificio 2. Sin embargo, con el fin de optimizar la inversión se debe considerar un manejo integral del sistema de oferta y demanda, ya que no es necesario almacenar la lluvia total anual para su uso conforme al requerimiento hídrico de lechuga. Más aun, en un sistema hidropónico vertical o *indoor*, el volumen captado es suficiente para obtener una producción continua durante los meses de lluvia, figura 8 y el tamaño del reservorio sería proporcional al tiempo que se desee seguir cultivando.

Otra opción dentro del manejo integral de los sistemas de captación de agua de lluvia es estimar la disponibilidad diaria de agua con base en el total de agua cosechada en el año, lo cual requiere de estimar el tamaño de cisterna, que permita almacenar el excedente que ocurre en algunos meses para usarlo en la época de escasa precipitación (noviembre -abril).

El resultado final de estos estudios, complementan la información para llegar al diseño, de los sistemas de captación de agua de lluvia (OPS, OMS y CEPIS, 2003), considerando las partes que los conforman de acuerdo a (Isla urbana, 2017): techo, bajantes, canaletas, tlaloque, filtro de hojas, cisterna y filtros.

## CONCLUSIONES

Mediante este estudio, se logró generar una metodología para estimar el volumen de agua de lluvia para captación de techos urbanos con uso en la producción de la agricultura urbana, con el apoyo de la información obtenida por imágenes de un VANT, que mediante el procesamiento fotogramétrico se obtuvo un MDS y un ortomosaico. Permiten estimar el área de captación y el coeficiente de escurrimiento variable para cada área. Se logró, con la información de precipitación diaria, formar la matriz de promedios mensuales, identificando la época húmeda y seca, que es importante para la planeación del sistema agronómico. Se obtuvieron los volúmenes de captación de agua de lluvia para cada edificio y se propuso el sistema de producción del cultivo de lechuga en hidroponía, logrando satisfacer su demanda hídrica.

## AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, por el apoyo en el proyecto interno no. RD1902.1, titulado: Evaluación de horticultura vertical en el IMTA en apoyo a la gestión integrada del agua a nivel de edificaciones en zonas urbanas.

## CONFLICTOS DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses relacionados con la información en este trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agisoft LLC. 2019. "Agisoft Metashape Pro".
- Amos, Caleb Christian, Aatur Rahman, y John Mwangi Gathenya. 2018. "Economic analysis of rainwater harvesting systems comparing developing and developed countries: A case study of Australia and Kenya". *Journal of Cleaner Production* 172:196–207.
- Amos, Caleb Christian, Aatur Rahman, Fazlul Karim, y John Mwangi Gathenya. 2018. "A scoping review of roof harvested rainwater usage in urban agriculture: Australia and Kenya in focus". *Journal of Cleaner Production* 202:174–90.
- de Anda, José, y Harvey Shear. 2017. "Potential of vertical hydroponic agriculture in Mexico". *Sustainability (Switzerland)* 9(1).
- Aparicio-Mirajés, Francisco J. 1992. *Fundamentos de hidrología de superficie*. Primera re. editado por Editorial Limusa. México, D.F., México.
- Arroyo-Zambrano, Tania Isabel. 2013. "Colecta de agua pluvial como medida para el uso eficiente de la energía y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> análisis económico y ambiental". Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Barbosa, Guilherme Lages, Francisca Daiane Almeida Gadelha, Natalya Kublik, Alan Proctor, Lucas Reichelm, Emily Weissinger, Gregory M. Wohlleb, y Rolf U. Halden. 2015. "Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. Conventional agricultural methods". *International Journal of Environmental Research and Public Health* 12(6):6879–91.
- Basán-Nickisch, Mario, Luciano Sánchez, Rubén Tosolini, Fabián Tejerina-Díaz, y Patricia Jordan. 2018. "Sistemas de captación de agua de lluvia para consumo humano, sinónimo de agua segura". *Aqua-LAC* 10(1):15–25.
- Breña-Puyol, Agustín Felipe, y Marco Antonio Jacobo-Villa. 2006. *Principios y fundamentos de la hidrología superficial*. Coordinaci. México, D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Caballero-Aquino, Tertuliano. 2006. *Captación de agua de lluvia y almacenamiento en tanques de ferrocemento. Manual técnico*. México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional.
- Campos-Aranda, Daniel Francisco. 2010. *Introducción a la Hidrología Urbana*. Primera ed. editado por D. F. Campos-Aranda. San Luis Potosí, México, S.L.P., México: Printego, San Luis Potosí, México.
- Chávez, Morales Jesús. 2010. *Curso de Hidrología Superficial*. Primera ed. Montecillo, Texcoco, Edo. de México: Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. de México.
- Chereque-Morán, Wendor. 1989. *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil*. Pontificia. Lima, Perú: CONCYTEC.
- Chow, V., D. Maidment, y L. Mays. 1994. *Hidrología aplicada*. McGraw Hil. Santafé de Bogotá, Colombia.
- CONAGUA. 2016. *Lineamientos técnicos: Sistema de captación de agua de lluvia con fines de abasto de agua potable a nivel vivienda*. 1. México, D.F.
- CONAGUA. 2018. *Estadísticas del agua en México, edición 2018*. Ciudad de México.
- Critchley, Will, y Klaus Siegert. 1991. *Water harvesting*. Roma, Italia.
- Critchley, Will, Klaus Siegert, y C. Chapman. 1991. *Water harvesting*. AGL/MISC/17/91. Roma, Italia.
- Defilipis, C., S. Pariani, A. Jimenez, y C. Bouzo. 2006. "Respuesta al riego de lechuga (*Lactuca sativa* L.) cultivada en invernadero". <https://www.researchgate.net/publication/228910447> (January 2006):8. Recuperado ([http://s3.amazonaws.com/academia.edu/documents/43275935/Respuesta\\_al\\_riego\\_de\\_lechuga\\_Lactuca\\_s20160302-29062-v5cwe4.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1491015031&Signature=e1GCZ5HumIOvitbE4VL%252BNNxXMjI%253D&response-content-disposition=inl](http://s3.amazonaws.com/academia.edu/documents/43275935/Respuesta_al_riego_de_lechuga_Lactuca_s20160302-29062-v5cwe4.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1491015031&Signature=e1GCZ5HumIOvitbE4VL%252BNNxXMjI%253D&response-content-disposition=inl)).
- Escarabajal-Henarejos, D., J. M. Molina-Martínez, D. G. Fernández-Pacheco, F. Cavas-Martínez, y G. García-Mateos. 2015. "Digital photography applied to irrigation management of Little Gem lettuce". *Agricultural Water Management* 151:148–57.
- ESPA, Innovative Water Solutions. 2002. *Aprovechamiento agua de lluvia*. España.
- FAO. 2013. *Captación y almacenamiento de agua de lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe*. FAO. Santiago, Chile.
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2014. *Feasibility Study of Rainwater Harvesting for Agriculture in the Caribbean Subregion*. FAO. Roma, Italia.



- Fattorelli, Sergio, y Pedro C. Fernández. 2011. *Diseño Hidrológico*. Vol. 2º Edición. WASA-GN. Zaragoza, Argentina.
- Flores-Velázquez, Jorge, Fernando Rojano, y Ernesto Aguilar. 2019. "ETo estimation to schedule irrigation in a green wall using Cropwat". en *2019 Boston, Massachusetts July 7- July 10, 2019*. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Fontalvo-Jaraba, C. C., C. G. Ortiz-Montero, D. C. Castro-Rivera, L. F. Santana-Callejas, y O. F. Borda-Casas. 2018. "Generación y comparación de ortofotos realizadas a partir de procedimientos fotogramétricos como insumo en la adopción del catastro multipropósito urbano en Colombia." *Revista De Topografía AZIMUT* 9(febrero 2018):1-8.
- Ghimire, Santosh R., y John M. Johnston. 2019. "Sustainability assessment of agricultural rainwater harvesting: Evaluation of alternative crop types and irrigation practices" editado por P. Pandey. *PLOS ONE* 14(5):e0216452.
- Isla urbana. 2017. *Manual de mantenimiento para su sistema residencial*. México, D.F.
- Linsley, J. R. K., M. A. Kohler, y J. L. H. Paulus. 1977. *Hidrología para ingenieros*. McGraw-Hil. Bogotá, Colombia.
- Lluís-Huguet, Jordi, Jean Oró, Vicente Tormo, Maria Cinta-Pastor, y Sílvia González. 2016. *Guía técnica de aprovechamiento de aguas pluviales en edificios*. España.
- Lupia, Flavio, Valerio Baiocchi, Keti Lelo, y Giuseppe Pulighe. 2017. "Exploring rooftop rainwater harvesting potential for food production in urban areas". *Agriculture (Switzerland)* 7(6):1-17.
- Martínez-Menes, M., D. Fernández-Reynoso, y R. Salas-Martínez. 2010. *Hidrología aplicada a las pequeñas obras hidráulicas*. Vol. 1. Colegio de postgraduados, campus Montecillo, Texcoco, México.
- Martínez-Saldaña, Tomás, Jacinta Palerm, Milka Castro, y Luis Pereir. 2011. *Riegos ancestrales en Iberoamérica. Técnicas y organización social del pequeño riego*. Colpos. editado por T. Martínez-Saldaña. Montecillo, Texcoco, Edo. de México: bba. Texcoco, Edo. de México.
- Martínez de Azagra-Paredes, Andrés. 2006. *Particularización al método de los coeficientes de escorrentía*. 2006. España.
- Mekdaschi-Studer, R., y H. Liniger. 2013. *Water Harvesting: Guidelines to Good Practice*. Centre for Development and Environment (CDE). Rome: Bern; Rainwater Harvesting Implementation Network (RAIN), Amsterdam; MetaMeta, Wageningen; The International Fund for Agricultural Development (IFAD).
- Méndez-Cubillo, José Andrés. 2016. "Análisis de la viabilidad de un sistema de captura de agua y su almacenamiento para uso en el beneficiado húmedo en la cooperativa de caficultores de Pílangosta R.L., del Cantón de Hojancha, Guanacaste". Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- Mohajeri, Nahid, Dan Assouline, Berenice Guiboud, Andreas Bill, Agust Gudmundsson, y Jean-Louis Scartezzini. 2018. "A city-scale roof shape classification using machine learning for solar energy applications". *Renewable Energy* 121:81-93.
- Monsalve-Sáenz, Germán. 1995. *Hidrología en la ingeniería*. Primera ed. editado por G. Monsalve-Sáenz. Santafé de Bogotá, Colombia: Departamento de Publicaciones Escuela de Colombia de Ingeniería.
- Morales-Pinzón, Tito. 2012. "Modelling and sustainable management of rainwater harvesting in urban systems". Institute of Environmental Science and Technology (ICTA) at Universitat Autònoma de Barcelona (UAB).
- OPS, OMS, y CEPIS. 2003. *Captación de agua de lluvia para consumo humano. Especificaciones técnicas*. OPS/CEPIS/02.60-UNATSABAR. Lima, Perú.
- OPS, OMS, CEPIS, y COSUDE. 2004. *Guía de diseño para captación del agua de lluvia*. OPS/CEPIS/04.122. Lima, Perú.
- Ortiz-Moreno, Jorge Adrián, Tania Arroyo-Zambraño, y Alfredo Fuentes-Gutiérrez. 2015. *Análisis de la viabilidad de la incorporación de sistemas de captación de agua pluvial en los desarrollos inmobiliarios bajo el programa de hipoteca verde de infonavit*. Vol. 1. México, D.F.
- Palmer, Diane, Elena Koumpli, Ian Cole, Ralph Gottschalg, y Thomas Betts. 2018. "A GIS-based method for identification of wide area rooftop suitability for minimum size PV systems using LiDAR data and photogrammetry". *Energies* 11(12):1-22.
- Parece, Tammy E., Malayshia Lumpkin, y James B. Campbell. 2016. *Irrigating Urban Agriculture*

- with Harvested Rainwater: Case Study in Roanoke, Virginia, USA*. The Handbo. Springer International Publishing.
- Pedroza-Sandoval, Aurelio, José Antonio Chávez-Rivero, Ricardo Trejo-Calzada, y José Ruíz-Torres. 2014. "Sistema de captación de agua de lluvia (SCALL) y bioproductividad en comunidades marginadas de zonas áridas". P. 41 en *Impluvium*. Vol. I. Bermejillo, Dgo.
- Pérez-Hernández, Aurora, Oscar Luis Palacios-Vélez, Manuel Anaya-Garduño, y Jorge Leonardo Tovar-Salinas. 2018. "Agua de lluvia para consumo humano y uso doméstico en San Miguel Tulancingo, Oaxaca". *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8(6):1427-32.
- Pizarro, Roberto, Alejandro Abarza, Carolina Morales, Ronald Calderón, Jaime Tapia, Pablo García, y Miguel Córdova. 2015. *Manual de diseño y construcción de sistemas de captación de aguas lluvias en zonas rurales de Chile*. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N° 36.
- Rahman, Aatur. 2017. "Recent advances in modelling and implementation of rainwater harvesting systems towards sustainable development". *Water (Switzerland)* 8(12):6-9.
- Salinas-Hernández, Adriana Guadalupe. 2015. "Impacto ambiental, social y económico derivado de la implementación de sistemas de captación y almacenamiento de agua de lluvia en dos estudios de caso en México". Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, Michoacán.
- SCT. 2000. *Estudios Hidráulico-Hidrológicos para Puentes*. México, D.F.
- SE. 2013. "Norma Mexicana. NMX-AA-164-SC-FI-2013. Edificación sustentable - criterios y requerimientos ambientales mínimos". 158.
- SMN. 2017. "Estaciones Climatológicas 2016". *Servicio Meteorológico Nacional*. Recuperado (<http://smn.cna.gob.mx/tools/RECURSOS/estacion/EstacionesClimatologicas.kmz>).
- Solano, C., F. Gonzaga, F. Espinoza, y J. Espinoza. 2017. "Sistema de captación de agua de lluvia para uso doméstico, Isla Jambelí, cantón Santa Rosa". *Cumbres* 3(1):151-59.
- UNATSABAR. 2001. *Guía de diseño para captación del agua de lluvia*. Vol. 1. Lima, Perú.
- Velasco-Muñoz, Juan F., José A. Aznar-Sánchez, Ana Batlles-de la Fuente, y Maria Dolores Fidelibus. 2019. "Rainwater harvesting for agricultural irrigation: An analysis of global research". *Water (Switzerland)* 11(7).
- Yousuf, Muhammad Uzair, Mubashir Siddiqui, y Naveed Ur Rehman. 2018. "Solar energy potential estimation by calculating sun illumination hours and sky view factor on building rooftops using digital elevation model". *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 10(1).
- Zunun-Bartolome, Jorge. 2009. "Elaboración de un procedimiento para el diseño de sistemas de captación de agua de lluvia para uso doméstico." Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.