

DOI: 10.24850/j-tyca-2026-05-05

Artículos

Modelos regionales para el dimensionamiento de tanques para almacenar agua de lluvia en Oaxaca, México

Regional models for sizing rainwater storage tanks in Oaxaca, Mexico

Gabriela Álvarez-Olguín¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7144-2426>

José del Carmen Jiménez-Hernández², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7864-1778>

René Morales-Luis³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0210-9814>

¹Universidad Tecnológica de la Mixteca-Instituto de Hidrología, Huajuapán de León, Oaxaca, México, galvarez@mixteco.utm.mx

²Universidad Tecnológica de la Mixteca-Centro de Modelación Matemática, Vinculación y Consultoría, Huajuapán de León, Oaxaca, México, jccjim@mixteco.utm.mx

³Universidad Tecnológica de la Mixteca-Instituto de Hidrología, Huajuapán de León, Oaxaca, México, rmluis@mixteco.utm.mx

Autora para correspondencia: Gabriela Álvarez-Olguín, galvarez@mixteco.utm.mx

Resumen

La óptima operación de un sistema de captación de agua de lluvia depende en gran medida de la selección adecuada del volumen del tanque de almacenamiento. No obstante, podría ser una tarea difícil debido a las diversas variables que intervienen en el funcionamiento del sistema. El objetivo de este trabajo fue generar modelos regionales para el estado de Oaxaca, que ayuden en la estimación de la capacidad adecuada de tanques de recolección de agua de lluvia en función de variables de fácil cuantificación. A partir de la lluvia diaria registrada en 60 estaciones climatológicas, se realizaron simulaciones del funcionamiento de tanques mediante la ecuación de balance de agua, en la cual se consideraron distintas capacidades de almacenamiento, áreas de recolección y dotaciones de agua. Los datos obtenidos de dichas simulaciones se analizaron con regresión lineal múltiple para generar 11 ecuaciones regionales que permiten la estimación del volumen activo de tanques de almacenamiento de agua de lluvia. Los coeficientes de determinación obtenidos fueron mayores a 0.9, por lo que 90 % de la variación es explicada por el modelo. El resultado obtenido será una herramienta que facilite la toma de decisiones durante el diseño de sistemas de captación de agua de lluvia a nivel domiciliario en el estado de Oaxaca.

Palabras clave: lluvia, almacenamiento de agua, equilibrio hídrico, análisis de regresión, modelo matemático, abastecimiento de agua, consumo de agua, Oaxaca, México.

Abstract

The optimal operation of a rainwater harvesting system depends mainly on correctly selecting the storage tank volume. However, due to the

various variables involved in the functioning of the system, this could be a difficult task. The objective of this research was to generate regional equations for the State of Oaxaca to estimate the adequate volume of rainwater collection tanks based on easily quantifiable variables. Based on the daily rainfall recorded in 60 weather stations, water tank simulations were carried out using the water balance equation, considering different values of storage volume, catchment area, and water demand. The data obtained were analyzed with multiple linear regressions to generate 11 regional equations to estimate the adequate volume of rainwater collection tanks. The determination coefficients obtained were higher than 0.9, so 90 % of the variation is explained by the model. The results will be a tool that helps make decisions during the design of Rainwater Harvesting Systems in households in the State of Oaxaca.

Keywords: rain, water storage, water balance, regression analysis, mathematical models, water supply, water consumption, Oaxaca, Mexico.

Recibido: 02/06/2025

Aceptado: 09/12/2025

Publicado *ahead of print*: 30/01/2026

Versión final: 01/09/2026

Introducción

La captación de agua de lluvia, la reutilización de aguas grises y la desalinización son prácticas no convencionales que pueden ayudar a reducir la presión sobre el agua a nivel mundial (Imteaz *et al.*, 2011). Con

respecto al agua de lluvia, para su aprovechamiento es necesario contar con estructuras para captarla, derivarla, conducirla, almacenarla y distribuirla, que en conjunto conforman un SCALL (sistema de captación de agua de lluvia). El agua de estos sistemas se puede utilizar para diversos usos que no requieren tratamiento para su potabilización, entre los que están descargas en inodoros y riego de jardines; mientras que después de su tratamiento se puede utilizar como agua potable (Londra *et al.*, 2015). Los SCALL permiten aumentar la disponibilidad de agua, al igual que otros beneficios ambientales y sociales, como la disminución del uso de agua superficial y subterránea (Abdulla, 2019). Por lo tanto, ayudan a frenar la sobreexplotación de ríos y acuíferos, así como la reducción del volumen de escurrimientos pluviales en áreas urbanas de rápido crecimiento (Guo & Baetz, 2007; Kim *et al.*, 2012; Sample & Liu, 2014). De esta manera, se contribuye a la mitigación de inundaciones.

En viviendas y edificios, el agua de lluvia se puede captar en techos (Abdulla, 2019; Fonseca *et al.*, 2017; Sample & Liu, 2014), para lo cual es necesario contar con una superficie de recolección, canaletas y tuberías de conducción, un dispositivo para remover las primeras lluvias y un tanque de almacenamiento (Sample & Liu, 2014; Vieritz *et al.*, 2015). La decisión más significativa para el diseño del sistema es la selección correcta de las dimensiones del tanque de almacenamiento (Campisano & Modica, 2012); la forma más usual para establecer la capacidad del mismo es mediante la aplicación de la ecuación de balance de agua (Campisano & Modica, 2012; Fewkes & Butler, 2000; Ghisi & Ferreira, 2007; Londra *et al.*, 2015; Villarreal & Dixon, 2005; Álvarez-Olguín *et al.*, 2022). Con esta ecuación se simula el volumen de agua en el tanque a través de un periodo de tiempo en función de las entradas y salidas de agua estimadas a partir de datos lluvia y de una determinada demanda,

respectivamente (Basinger *et al.*, 2010). Sin embargo, tal simulación podría ser relativamente difícil para alguien que carezca de conocimientos básicos en hidrología debido a la cuantificación, procesamiento y análisis de las múltiples variables que intervienen en el proceso.

En el estado de Oaxaca, México, existen 3 063 localidades con cobertura de agua potable menor al promedio nacional (90 %). Para estas localidades, la captación de agua de lluvia es una alternativa que puede contribuir a aumentar la disponibilidad de agua para uso humano. Sin embargo, usualmente quienes promueven el empleo de esta fuente de agua son miembros de organizaciones civiles que en ocasiones tienen dificultades para seleccionar la capacidad adecuada de los tanques de almacenamiento debido a que hay diversos factores que influyen en tal decisión, como la variación espacial y temporal de la lluvia, el área disponible de la superficie de recolección de agua pluvial, la cantidad de agua requerida para cubrir la demanda y el número de usuarios. Con base en lo anterior, el objetivo de esta investigación fue generar modelos regionales para el estado de Oaxaca que permitan estimar el volumen adecuado de tanques de recolección de agua de lluvia, en función de variables fácilmente cuantificables. Se pretende que tales modelos sean una herramienta que facilite la toma de decisiones sobre el diseño de los SCALL para quienes promueven el aprovechamiento de agua de lluvia con fines de uso doméstico.

Materiales y métodos

De la página del Sistema de Información Hidrológica a cargo de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) se descargaron los registros diarios de las estaciones climatológicas convencionales ubicadas en el

estado de Oaxaca y en los límites de los estados vecinos (Puebla, Guerrero, Veracruz y Chiapas). Los datos diarios de lluvia se ordenaron y analizaron para obtener las series mensuales y anuales de lluvia acumulada. Se asumió que los años con buena cantidad de información son los que tienen más del 90 % de registros diarios completos (al menos 328 registros). Para los análisis posteriores, se seleccionaron las estaciones con buena cantidad de información con al menos 10 años de registros entre 2000 y 2017.

A las series anuales obtenidas se les aplicó la prueba de Grubbs-Shapiro (Grubbs & Beck, 1972; Shapiro & Wilk, 1965) para identificar datos atípicos, que se compararon con los datos de estaciones circundantes para verificar si correspondían a eventos extraordinarios de lluvia que se manifestaron simultáneamente en varias estaciones. Los casos donde se tuvieron valores altos de lluvia tanto en la estación de análisis como en las circundantes se descartaron como datos atípicos y se consideraron como valores extremos.

Debido a que la mayoría de las estaciones tiene registros incompletos en el periodo de análisis, los datos diarios faltantes se estimaron con el método de la distancia inversa ponderada (Shepard, 1968). En este método se utilizaron las ecuaciones (1) y (2), que incluyeron dos estaciones vecinas y un exponente de la distancia igual a dos:

$$\hat{x}_e = \hat{w}_1 \cdot x_1 + \hat{w}_2 \cdot x_2 \quad (1)$$

Donde:

$\hat{x}_e$ = valor estimado de la variable x en la estación de interés.

x_i = dato registrado en la estación vecina i , $i = 1, 2$.

$$\hat{w}_i = \frac{\frac{1}{d_i^2}}{\frac{1}{d_1^2} + \frac{1}{d_2^2}} \quad (2)$$

Donde:

$\hat{w}_i$ = estimador del peso correspondiente a la estación vecina i

d_i = distancia entre la estación de interés y la estación vecina i

El volumen de un tanque de almacenamiento se establece con base en diversos factores, como la variación espacial y temporal de la lluvia, el área de la superficie de recolección de agua pluvial, el coeficiente de escorrentía y la demanda de agua (Palla *et al.*, 2012). La forma más usual para estimar el volumen adecuado es a partir de la ecuación de balance de agua (Campisano & Modica, 2012; Londra *et al.*, 2015; Álvarez-Olguín *et al.*, 2022). Con esta ecuación se simula el volumen de agua disponible en el tanque durante un determinado periodo de tiempo. El volumen de agua que entra al tanque se estima a partir de datos de lluvia, mientras que el volumen de agua que sale del mismo depende de la demanda de agua determinada (Basinger *et al.*, 2010).

De acuerdo con la metodología expuesta por Álvarez-Olguín *et al.* (2022), con los datos diarios de lluvia de las estaciones seleccionadas se llevaron a cabo simulaciones del funcionamiento del volumen del agua disponible en tanques de diferentes capacidades a partir del modelo de balance de agua definido por la Ecuación (3):

$$V_t = V_{t-1} + I_t - S_t - E_t \quad (3)$$

Donde:

V_t = cantidad de agua en el tanque al final del día t (m^3).

V_{t-1} = cantidad de agua en el tanque al inicio del día t (m^3).

S_t = cantidad de agua que sale por derrame (m^3).

E_t = cantidad de agua extraída para uso doméstico (m^3).

I_t = cantidad de agua de lluvia que ingresa al tanque (m^3), la cual se estimó a partir de la Ecuación (4):

$$I_t = CAP_t \quad (4)$$

Donde:

I_t = cantidad de agua de lluvia captada del techo (m^3) en el día bajo análisis.

C = coeficiente de escurrimiento.

A = superficie de captación (m^2).

P_t = lluvia efectiva ocurrida en el día t (m).

La lluvia efectiva se asumió como la lluvia diaria menos la primera descarga equivalente a 0.33 (Londra *et al.*, 2015). Por otro lado, las pérdidas por evaporación y fugas se consideraron despreciables, dado que el tanque por lo común está completamente cerrado para evitar la contaminación del agua y la aparición de algas por la incidencia de rayos solares.

Para resolver la Ecuación (3) se utilizó el algoritmo expuesto en las ecuaciones (5) a (7), donde se consideró que las salidas por derrame se presentan antes de la extracción (Vieritz *et al.*, 2015):

$$E_t = \min[D_t, V_{t-1}] \quad (5)$$

$$V_t = \min[V_{tan} - E_t, V_{t-1} + I_t - E_t] \quad (6)$$

$$S_t = \max[(V_{t-1} + I_t) - V_{tan}, 0] \quad (7)$$

Donde:

D_t = demanda (m^3) en el día bajo análisis, obtenida con la Ecuación (8).

V_{tan} = volumen activo (m^3) que no incluye al volumen muerto.

$$D_t = U \cdot D \quad (8)$$

Donde:

U = número de usuarios que serán abastecidos por el sistema.

D = dotación o cantidad de agua establecida por persona al día.

Se asumió que el volumen promedio al año de agua pluvial captada es equivalente a la demanda promedio anual (Tsihrantzis & Baltas, 2013); entonces, el área mínima necesaria de captación de agua de lluvia, A_{min} , para cubrir la demanda de agua se estimó como:

$$A_{min} = \frac{365.U.D}{CP} \quad (9)$$

Donde:

P = lluvia promedio anual en (m).

En las simulaciones de la operación de los tanques se establecieron diferentes valores de volumen activo (V_{tan}) y se consideró que el tanque se encontraba sin agua el primer día del periodo de la simulación. Además, se incluyeron distintas superficies de captación, números de usuarios y dotaciones de agua. Se propuso un coeficiente de escurrimiento (C) de 0.8, con el cual se asume que entra al tanque 80 % del total de la lluvia que cae sobre la superficie de captación. El volumen activo del tanque (V), se consideró igual al volumen mínimo, con el cual no se tendrán días con tanque vacío durante el periodo de simulación.

Se aplicaron de manera individual regresiones potenciales a los datos obtenidos de las simulaciones de cada estación. La forma estándar de las curvas ajustadas se indica en la Ecuación (10), en la cual se incluyeron los coeficientes $\frac{V}{A}$ y $\frac{UD}{A}$ adaptados de los números adimensionales utilizados por Khastagir y Jayasurita (2010):

$$\frac{V}{A} = a \left(\frac{UD}{A} \right)^b \quad (10)$$

Donde:

a y b = constantes.

Posteriormente, se identificaron las curvas ajustadas con formas similares con las cuales se formaron regiones de estaciones cercanas. La

zona de influencia de cada estación se determinó mediante el método de polígonos de Thiessen (Campos, 1984).

Para cada región, con los datos obtenidos de las simulaciones de los tanques, se realizaron regresiones lineales múltiples, definidas como se indica en la Ecuación (11). A partir de tales regresiones, se obtuvieron los modelos regionales de la forma mostrada en la Ecuación (12):

$$\ln \ln V = \ln \ln(a) + b_1 \ln \ln(U) + b_2 \ln \ln(D) + b_3 \ln \ln(A) + b_4 \ln \ln(P) \quad (11)$$

$$V = a \frac{U^{b_1} D^{b_2}}{A^{b_3} P^{b_4}} \quad (12)$$

Donde:

a, b_1, b_2, b_3 y b_4 = constantes.

V = volumen activo del tanque en m^3 .

U = número de usuarios.

D = dotación de agua por persona al día en l.

A = área de la superficie de captación en m^2 .

P = precipitación media anual en m.

Resultados y discusión

Con base en el número de observaciones disponibles por año, se determinó que el periodo más reciente con mejor cantidad de información es de 2000 a 2017. El número de estaciones que tienen al menos 328 registros diarios por año (90 % de datos) en este periodo fue de 139, a

partir de las cuales se construyeron la Figura 1 y Figura 2. El mapa que se presenta en la Figura 1 muestra el promedio anual de las precipitaciones para las 139 estaciones climatológicas bajo estudio; se observa que los valores más altos de este promedio anual se presentan al noreste del estado, donde se tienen más de 3 000 mm de lluvia al año, mientras que los más bajos corresponden al noroeste con menos de 400 mm de lluvia. En cuanto a la variación temporal de la lluvia durante el periodo analizado (Figura 2), se encontró que en 2007 se tuvo el valor más bajo de lluvia media y el más alto se presentó en 2010; además, no se observó una variación marcada durante el periodo de estudio.

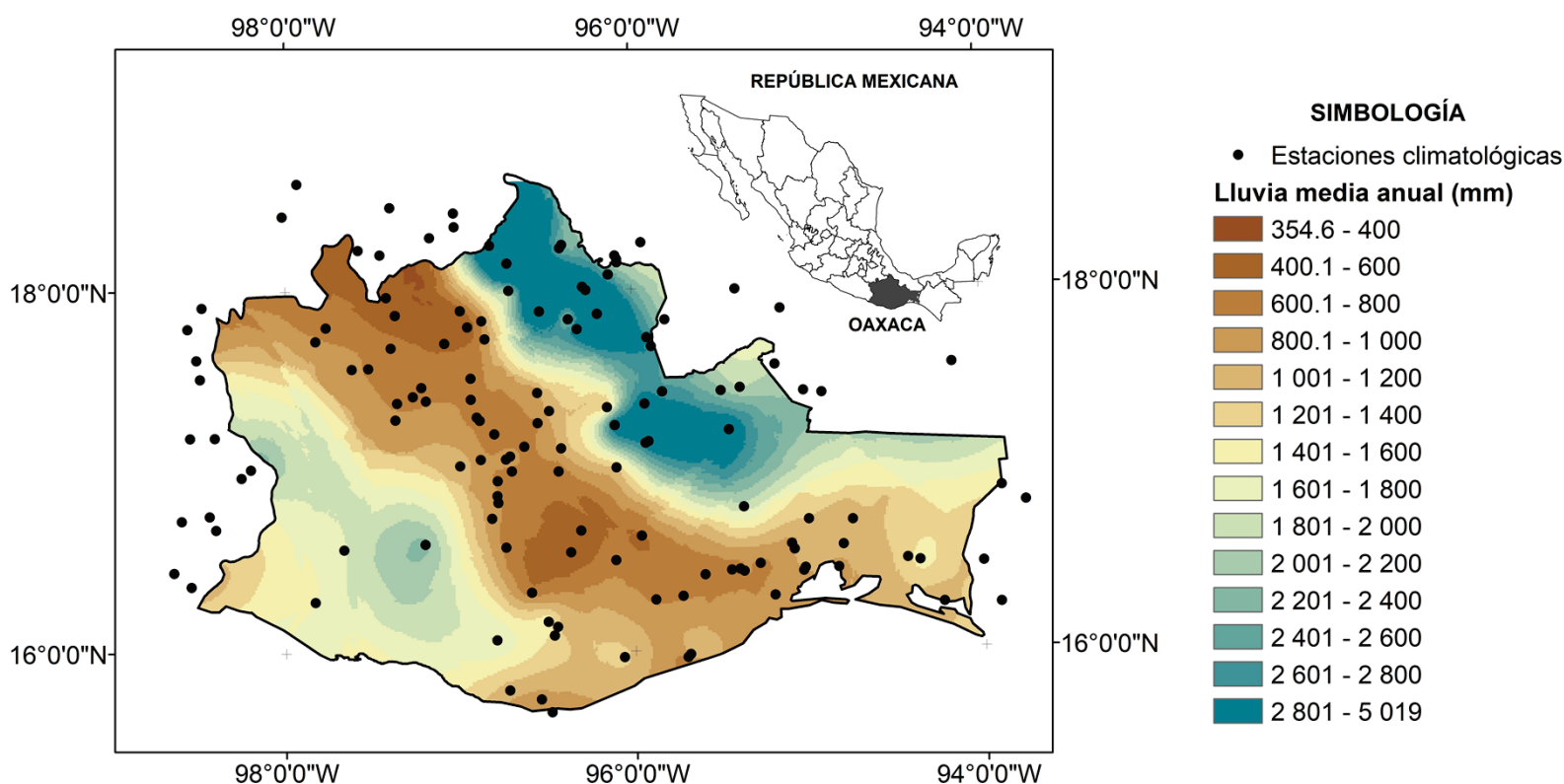


Figura 1. Variación espacial de lluvia media anual en el estado de Oaxaca, México (2000-2017).

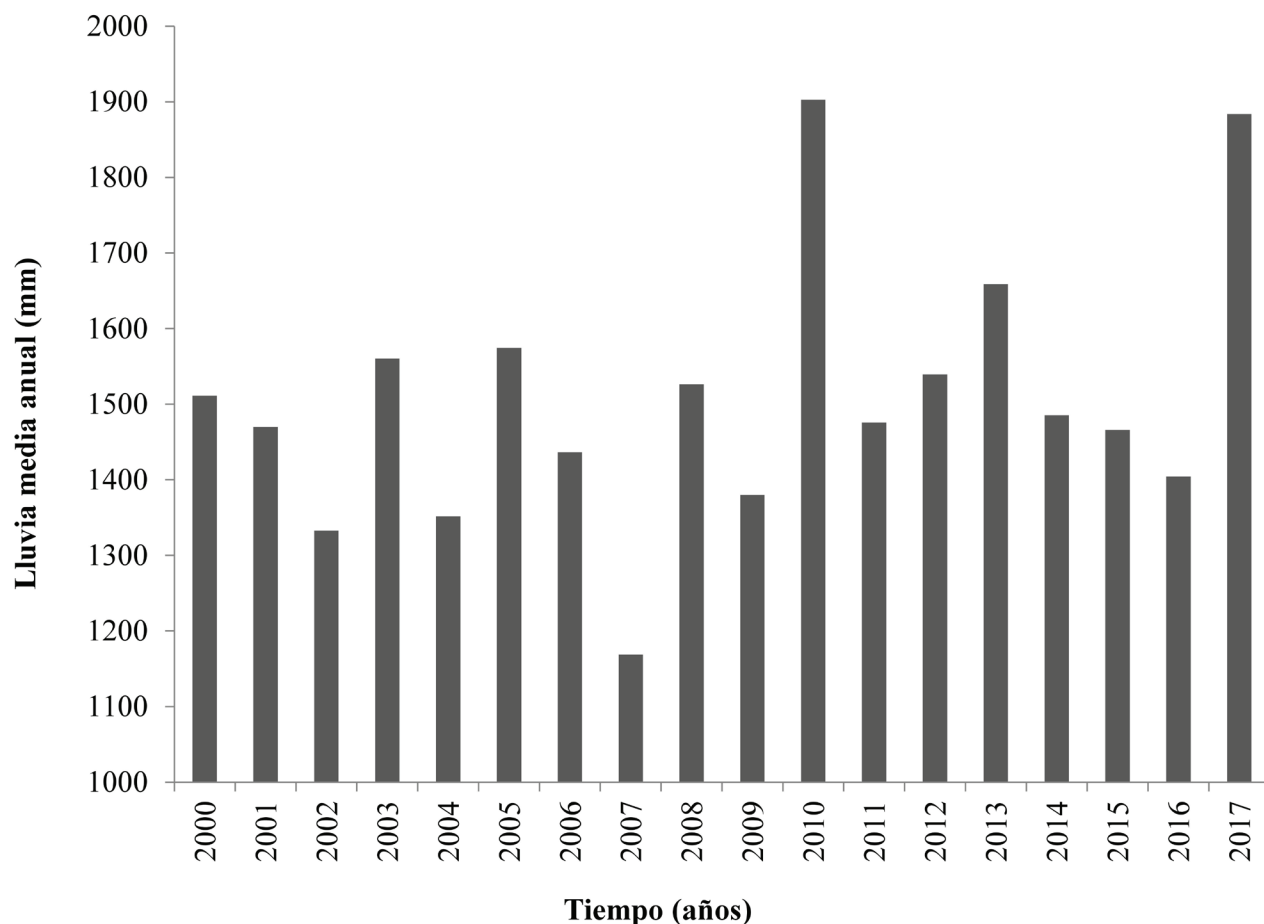


Figura 2. Variación temporal de la lluvia media anual en el estado de Oaxaca, México.

A partir de las pruebas de Grubbs-Shapiro realizadas a los datos de las 139 estaciones seleccionadas, se determinó que la mayor cantidad de estaciones con datos atípicos corresponden a 2010 y 2017, para los cuales también se tienen valores mayores a 1 700 mm de lluvia anual. Esto indica que la mayoría de los datos atípicos corresponde a eventos extremos de lluvia que se presentaron de manera generalizada en toda la

entidad. Esto se pudo corroborar al comparar cada dato atípico con los registros de las estaciones circundantes. Cuando los datos atípicos discrepaban, se asumieron como errores de medición o captura, y en consecuencia las estaciones se descartaron.

Del total de estaciones, en 60 se dedujeron datos faltantes para homogeneizar la longitud de las series. Con los registros diarios de estas, se aplicó el modelo de balance de agua para obtener los volúmenes requeridos de tanques relacionados con diferentes valores de áreas de recolección, demandas y usuarios. Como ejemplo de los resultados obtenidos se muestra en la Figura 3 la simulación realizada para la estación 20079 de Oaxaca de Juárez, Oaxaca. Para dicha localidad se determinó que para suministrar 10 litros de agua por persona al día a una vivienda de seis habitantes (60 litros al día), con una superficie de captación de 40 m², el volumen óptimo del tanque es de 14.6 m³. Este es el volumen mínimo con el cual no se tuvieron días con tanque vacío durante el periodo 2000-2017. Además, en la Figura 3 se observa que en 2005 hubo un periodo crítico en abril, cuando se tuvo el volumen almacenado más bajo (aproximadamente 10 litros); no obstante, el nivel en el tanque se pudo recuperar debido al inicio de la época de lluvias.

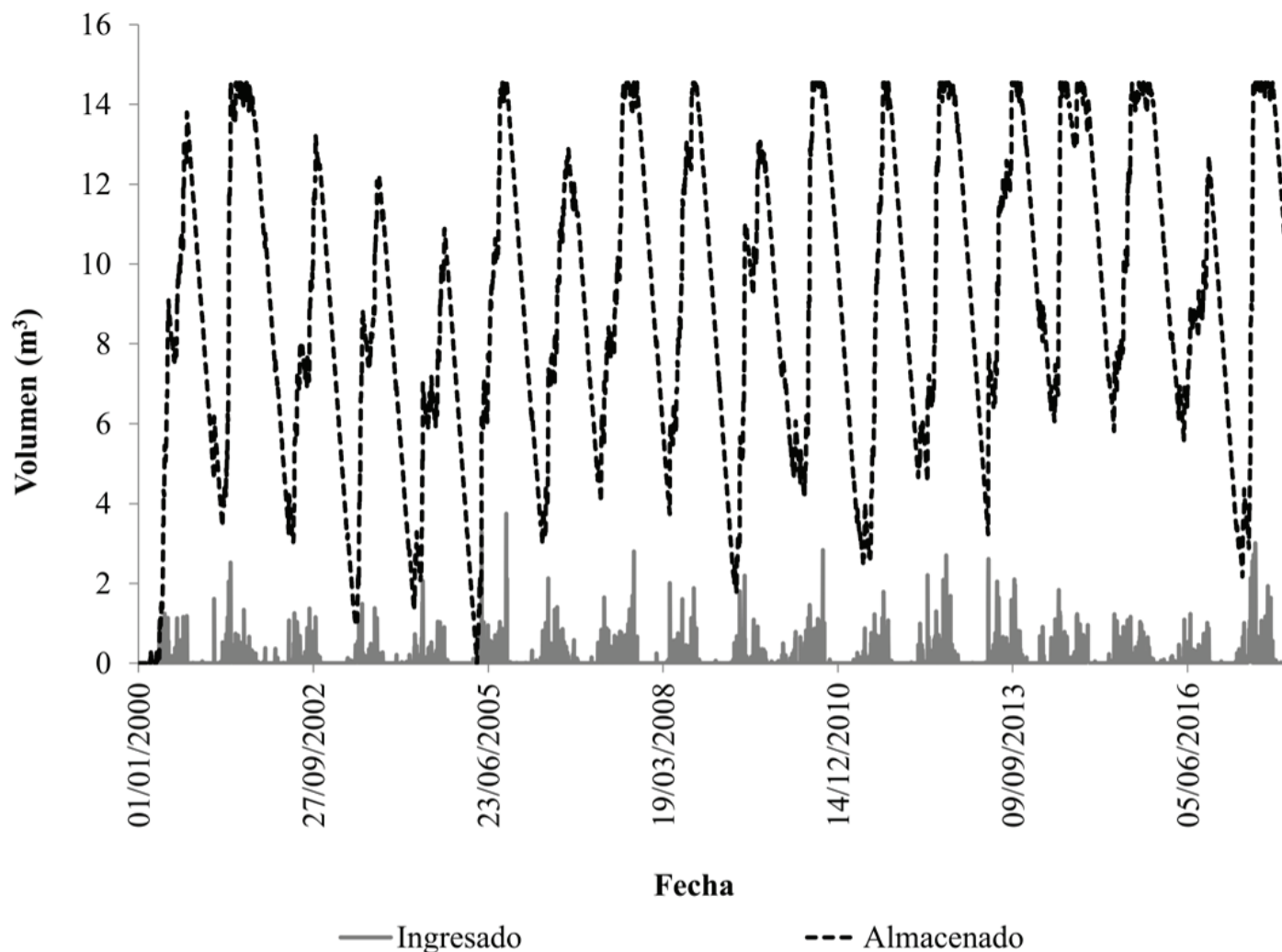


Figura 3. Simulación de balance de agua para la estación 20079 de Oaxaca de Juárez, Oaxaca, México, bajo las siguientes condiciones: $V_{opt} = 14.6 \text{ m}^3$, $A = 40 \text{ m}^2$, $U = 6$ habitantes, $D = 10$ litros por persona al día.

Los resultados de las estimaciones de los parámetros de las regresiones potenciales realizadas a cada estación, así como el correspondiente coeficiente de determinación estimado, se muestran en

la Tabla 1. Debido a que los coeficientes de determinación son mayores a 0.9, se consideró que los ajustes son adecuados.

Tabla 1. Estimación de los parámetros a y b de funciones potenciales de la forma $\frac{V}{A} = a \left(\frac{UD}{A} \right)^b$ y coeficiente de determinación R^2 .

Clave de la estación	a	b	R^2
27	0.381	2.5057	0.9938
37	0.0987	3.4702	0.9749
41	0.1243	3.1012	0.9951
75	0.1858	2.2008	0.9978
7182	0.0175	3.5116	0.9917
7376	0.0242	3.7748	0.9921
12061	0.1305	1.8727	0.9987
12226	0.1016	2.502	0.9983
20004	0.0235	5.2564	0.9993
20007	0.0686	2.7827	0.994
20014	0.0854	1.4408	0.9994
20017	0.0329	2.5523	0.9973
20020	0.132	2.3897	0.9978
20025	0.4944	2.1587	0.9931
20027	0.0762	3.5093	0.9954
20029	0.0418	1.7115	0.9993
20032	0.3551	2.7472	0.9991
20034	0.2045	3.5978	0.9942
20039	0.077	3.9371	0.9951

Clave de la estación	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
20040	0.1583	2.3495	0.9969
20041	0.0635	3.2936	0.9732
20042	0.0714	1.6069	0.9839
20043	0.247	2.7663	0.9981
20044	0.0632	4.2263	0.9758
20048	0.0468	1.483	0.9984
20070	0.1336	5.5173	0.9885
20073	0.1953	3.7884	0.9776
20079	0.0676	4.1822	0.9943
20082	0.1141	2.5575	0.9899
20084	0.1334	1.4303	0.9641
20096	0.4604	3.1929	0.9949
20117	0.1575	2.379	0.9988
20120	0.0102	4.5805	0.9701
20151	0.048	5.6034	0.9595
20152	0.1473	1.2556	0.9991
20153	0.0058	3.5252	0.9634
20162	0.333	2.422	0.9955
20174	0.0698	1.5044	0.9991
20189	0.0543	1.7665	0.9981
20209	0.1499	2.9328	0.9958
20256	0.0887	2.4524	0.9973
20277	0.4155	2.1836	0.9988
20292	0.0762	2.6345	0.991
20294	0.132	1.3557	0.9878

Clave de la estación	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
20303	0.1787	2.0998	0.9971
20308	0.0296	3.6156	0.9918
20319	0.0768	3.1881	0.9913
20326	0.0818	2.7469	0.9943
20350	0.0551	2.7715	0.9981
20354	0.1883	2.144	0.9982
20367	0.0607	4.425	0.9798
20374	0.108	1.3382	0.9986
20379	0.108	3.3796	0.9966
20382	0.2479	2.9257	0.997
20387	0.0468	1.76	0.9979
20506	0.1097	1.4014	0.9989
30025	0.0179	2.9855	0.9702
30081	0.122	1.396	0.9961
30131	0.0888	1.5638	0.9977
30224	0.0934	1.5459	0.9982

A partir de los polígonos de Thiessen obtenidos para las estaciones que se muestran en la Tabla 1, se delimitaron 11 regiones pluviométricas homogéneas que incluyen las estaciones cuyas curvas potenciales ajustadas son similares, como se aprecia en la Figura 4. El número de estaciones por región oscila entre 3 y 9 (Figura 5). Las regiones 3, 4 y 6 son las que tienen menor cantidad de estaciones; mientras que la región 10 tiene la mayor cantidad.

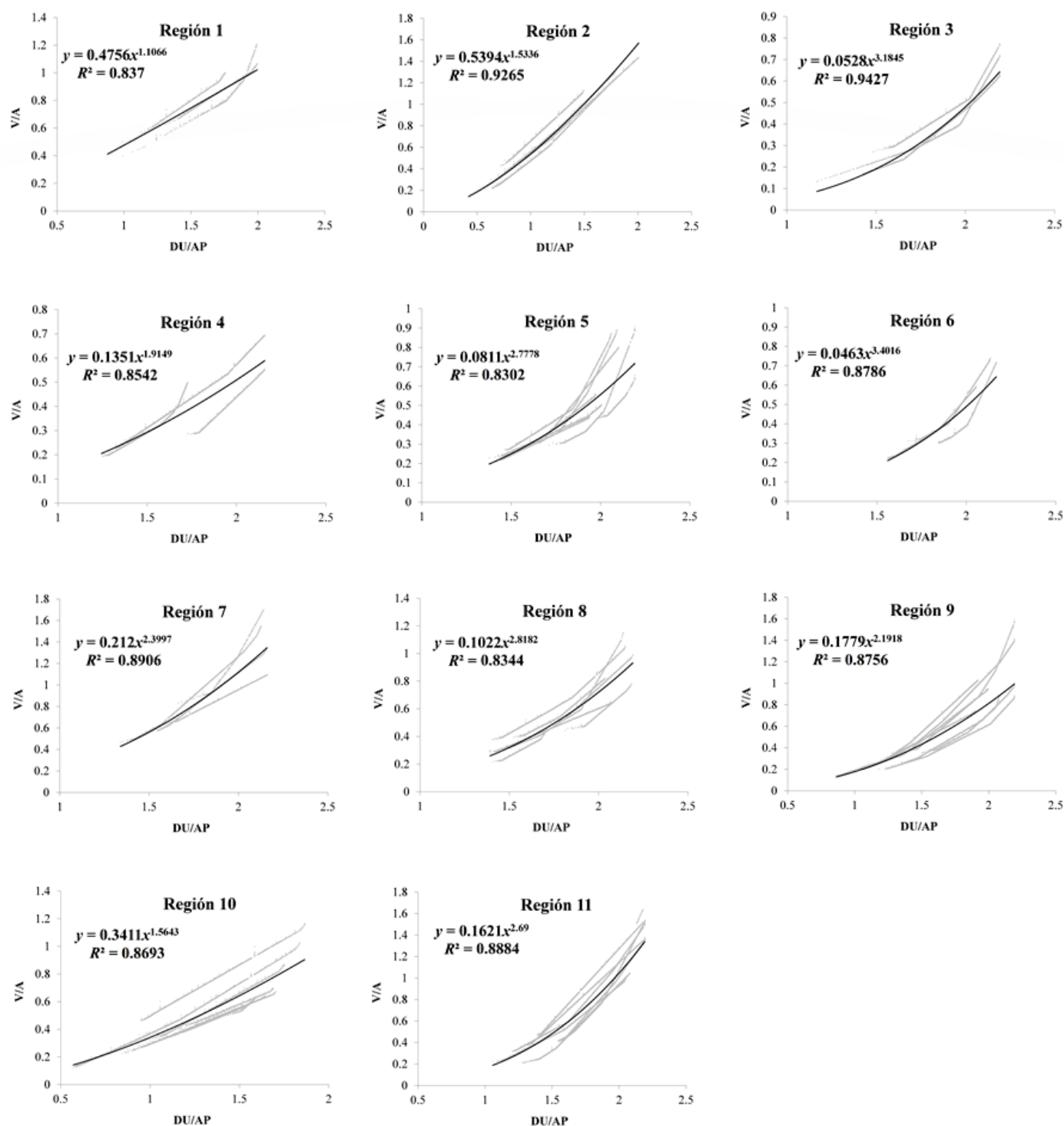


Figura 4. Curvas de las funciones potenciales ajustadas clasificadas por región de acuerdo con su forma.

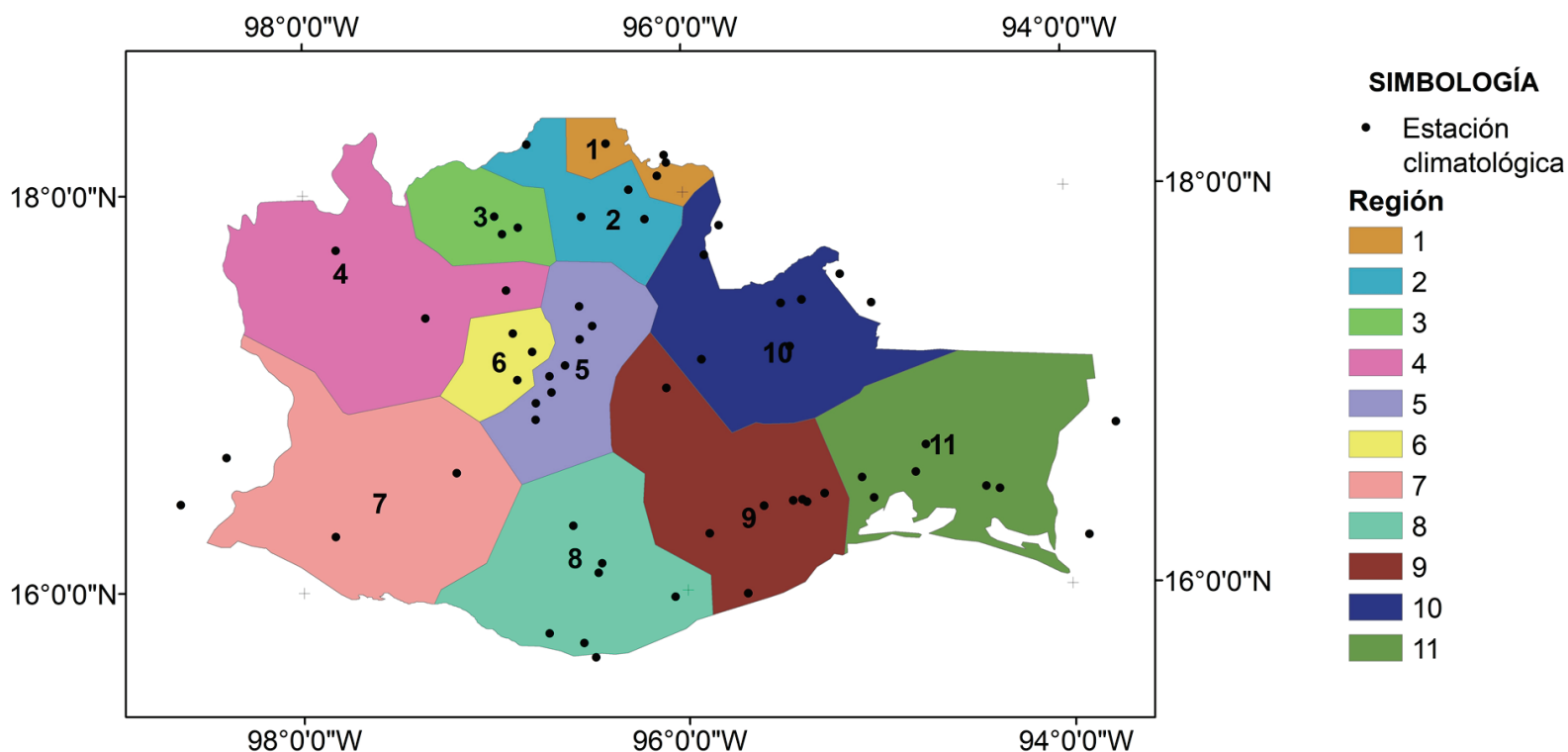


Figura 5. Distribución espacial de las regiones pluviométricas homogéneas.

En hidrología es común utilizar la técnica de regresión lineal múltiple para construir ecuaciones empíricas que permitan estimar variables en función de predictores que pueden ser directamente cuantificados. Por ejemplo, Campos-Aranda (2016) obtuvo ecuaciones empíricas para estimar el gasto máximo medio anual en función de parámetros geomorfológicos de cuencas y Fernandes *et al.* (2024) calibraron ecuaciones para estimar la precipitación media anual a partir de variables geoespaciales.

En esta investigación, con la técnica de regresión lineal múltiple se generaron ecuaciones regionales para estimar la capacidad de tanques de

almacenamiento agua de lluvia en función de la precipitación media anual, la demanda de agua y el área de captación. Los datos obtenidos de las simulaciones, junto con la precipitación media anual de las estaciones, fueron utilizados en las regresiones. Como variable dependiente se consideró al volumen activo (V) y como variables predictoras a la precipitación media anual (P), el área de captación (A), el número de usuarios (U) y la dotación de agua (D). La Tabla 2 contiene las estimaciones de los parámetros de las ecuaciones regionales, así como el correspondiente coeficiente de determinación para cada región. Se observa que el área y la precipitación son inversamente proporcionales al volumen activo, lo cual implica que, a mayores superficies de captación y precipitación media, el volumen será menor. Lo anterior es consistente con los resultados obtenidos por otros investigadores como Shadeed y Alawna (2021), quienes encontraron que el tamaño del tanque requerido para almacenar agua de lluvia para uso doméstico en Palestina es inversamente proporcional a la superficie de los techos; mientras que Londra *et al.* (2022) determinaron que los volúmenes de tanques más pequeños para satisfacer las necesidades de riego de cultivos de tomate en Grecia se tienen en zonas con alta precipitación anual y un periodo seco moderado. Por otro lado, los coeficientes de determinación obtenidos son mayores a 0.9, esto significa que 90 % de la variación de los datos se puede explicar por las variables predictoras, por lo que se consideró que los ajustes de las ecuaciones regionales son adecuados.

Tabla 2. Resumen de las regresiones lineales múltiples.

Región	R^2	a	b_1	b_2	b_3	b_4	Ecuación regional estimada
1	0.996	0.257	1.299	1.299	0.304	0.653	$V = 0.2571 \frac{(UD)^{1.299}}{A^{0.304}P^{0.653}}$
2	0.962	0.487	1.722	1.719	0.741	1.583	$V = 0.4874 \frac{U^{1.722}D^{1.719}}{A^{0.741}P^{1.583}}$
3	0.994	0.070	3.139	3.134	2.151	2.862	$V = 0.0698 \frac{U^{3.139}D^{3.134}}{A^{2.151}P^{2.862}}$
4	0.985	0.196	1.888	1.888	0.890	0.375	$V = 0.1957 \frac{(UD)^{1.888}}{A^{0.890}P^{0.375}}$
5	0.978	0.097	2.756	2.755	1.758	1.916	$V = 0.0966 \frac{U^{2.756}D^{2.755}}{A^{1.758}P^{1.916}}$
6	0.976	0.046	3.416	3.415	2.419	3.448	$V = 0.0462 \frac{U^{3.416}D^{3.415}}{A^{2.419}P^{3.448}}$
7	0.988	0.192	2.367	2.366	1.368	2.064	$V = 0.1924 \frac{U^{2.367}D^{2.366}}{A^{1.368}P^{2.064}}$
8	0.978	0.124	2.484	2.484	1.483	1.885	$V = 0.1238 \frac{(UD)^{2.484}}{A^{1.483}P^{1.885}}$
9	0.939	0.204	2.121	2.121	1.122	1.737	$V = 0.2042 \frac{(UD)^{2.121}}{A^{1.122}P^{1.737}}$
10	0.986	0.162	1.782	1.779	0.790	1.004	$V = 0.1622 \frac{U^{1.782}D^{1.779}}{A^{0.790}P^{1.004}}$
11	0.956	0.157	2.675	2.675	1.675	2.362	$V = 0.1570 \frac{(UD)^{2.675}}{A^{1.675}P^{2.362}}$

Es importante resaltar que la ubicación de las regiones pluviométricas delimitadas está directamente relacionada con la distribución espacial de la lluvia, de tal manera que las regiones 1, 2 y 10, ubicadas al noreste del estado, pertenecen a la zona donde los valores de lluvia media anual oscilan entre 2 000 y 3 000 mm. Mientras que las regiones 3, 4, 5, 6 y 9, ubicadas al oeste y centro del estado,

corresponden a zonas con menos de 800 mm de lluvia. De igual manera, las regiones 7 y 8 tienen casi la misma extensión que la zona suroeste, donde la lluvia media anual varía entre 1 600 y 2 200 mm. Por tal razón, es de esperarse que al estimar el volumen de un tanque en una localidad ubicada en la región 2, donde llueve más, este sea menor al estimado para una localidad ubicada en la región 5. Por ejemplo, para viviendas ubicadas en el municipio de San Lucas Ojitlán (región 2), se estimó que la capacidad del tanque requerida para suministrar 60 litros de agua al día ($D = 10$ l y $U = 6$ personas) con al menos una superficie de 20 m^2 es de 8 m^3 ; mientras que para el municipio de Oaxaca de Juárez (región 5), para la misma demanda y con superficie de captación de 40 m^2 , la capacidad necesaria del tanque es de 15.2 m^3 (obtenida con la ecuación de la Tabla 2). A pesar de que esta última superficie de captación es el doble de la primera, el volumen del tanque fue notablemente superior para Oaxaca de Juárez. Lo anterior permite mostrar que la magnitud de la lluvia influye en gran medida en la capacidad del tanque de almacenamiento y que no es posible estandarizar las características de los SCALL. Cada sistema se debe diseñar de acuerdo con las características propias de la vivienda y la demanda de agua que se pretende suministrar.

Conclusiones

Mediante la técnica de regresión lineal múltiple se obtuvieron 11 ecuaciones regionales que permiten estimar la capacidad de tanques para almacenar agua de lluvia en función de variables fácilmente cuantificables. Los coeficientes de correlación obtenidos son mayores a 0.9, lo cual indica que los modelos se ajustaron bien a los datos. La

ubicación de las regiones delimitadas está directamente relacionada con la distribución espacial de la lluvia, de tal manera que para las regiones donde llueve más, el volumen de los tanques destinados a almacenar agua de lluvia será menor en comparación con los tanques de localidades ubicadas dentro de las regiones donde llueve menos. Lo anterior permite mostrar que la magnitud de la lluvia influye de forma considerable en la capacidad de los tanques de almacenamiento; no obstante, para el adecuado dimensionamiento es necesario considerar también la demanda de agua y la superficie de captación de los techos. Estas ecuaciones serán una herramienta que facilite la toma de decisiones durante el diseño de un sistema de captación de agua de lluvia, sobre todo para las personas que no cuentan con conocimientos especializados en hidrología.

Financiamiento

La investigación procede de un proyecto de investigación interno financiado por la Universidad Tecnológica de la Mixteca.

Declaración de conflicto de interés

Lo autores declaran que no existe conflicto de interés.

Declaración de uso de IA

No se utilizaron herramientas de IA.

Referencias

- Abdulla, F. (2019). Rainwater harvesting in Jordan: Potential water saving, optimal tank sizing and economic analysis. *Urban Water Journal*, 17(5), 446-456. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2019.1648530>
- Álvarez-Olguín, G., Cisneros-Cisneros, C., Sustaita-Rivera, F., Morales-Luis, R., & Herrera-Arellano, I. (2022). Dimensionamiento óptimo de tanques de sistemas de captación de agua de lluvia para uso doméstico. *Tecnología y ciencias del agua*, 13(6), 166-208. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-13-06-04>
- Basinger, M., Montalto, F., & Lall, U. (2010). A rainwater harvesting system reliability model based on nonparametric stochastic rainfall generator. *Journal of Hydrology*, 392(3-4), 105-118. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.039>
- Campisano, A., & Modica, C. (2012). Optimal sizing of storage tanks for domestic rainwater harvesting in Sicily. *Resources, Conservation and Recycling*, 63, 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.03.007>
- Campos, A. D. (1984). *Procesos del ciclo hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Campos-Aranda, D. F. (2016). Una aplicación hidrológica de la regresión lineal múltiple ponderada. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(4), 161-173. <https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1266>

- Fernandes, A., de Alcântara, H., de Farias, C., & Filho, S. (2024). Estimation of average annual precipitation considering spatio-temporal variability through the use of multiple linear regression in the state of Paraíba. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 18(4), 1-11. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n4-011>
- Fewkes, A., & Butler, D. (2000). Simulating the performance of rainwater collection and reuse systems using behavioural models. *Building Services Engineering Research & Technology*, 21(2), 99-106. <https://doi.org/10.1177/014362440002100204>
- Fonseca, C. R., Hidalgo, V., Díaz-Delgado, C., Vilchis-Francés, A., & Gallego, I. (2017). Design of optimal tank size for rainwater harvesting systems through use of a web application and geo-referenced rainfall patterns. *Journal of Cleaner Production*, 145, 323-335. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.057>
- Ghisi, E., & Ferreira, D. (2007). Potential for potable water savings by using rainwater and greywater in a multi-storey residential building in southern Brazil. *Building and Environment*, 42(7), 2512-2522. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.07.019>
- Grubbs, F., & Beck, G. (1972). Extension of sample sizes and percentage points for significance tests of outlying observations. *Technometrics*, 14(4), 847-854. <https://doi.org/10.2307/1267134>
- Guo, Y., & Baetz, B. (2007). Sizing of rainwater storage units for green building applications. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(2), 197-205. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2007\)12:2\(197\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:2(197))

- Imteaz, M. A., Shanableh, A., Rahman, A., & Ahsan, A. (2011). Optimisation of rainwater tank design from large roofs: A case study in Melbourne, Australia. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 1022-1029. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.013>
- Khastagir, A., & Jayasuriya, N. (2010). Optimal sizing of rain water tanks for domestic water conservation. *Journal of Hydrology*, 381(3-4), 181-188. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.040>
- Kim, H., Han, M., & Lee, J. Y. (2012). The application of an analytical probabilistic model for estimating the rainfall-runoff reductions achieved using a rainwater harvesting system. *Science of the Total Environment*, 424, 213-218. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.02.021>
- Londra, P., Gkolfinopoulou, P., Mponou, A., & Theocharis, A. (2022). Effect of rainfall regime on rainwater harvesting tank sizing. *Hydrology*, 9(7), 122. <https://doi.org/10.3390/hydrology9070122>
- Londra, P., Theocharis, A., Baltas, E., & Tsihrintzis, V. (2015). Optimal sizing of rainwater harvesting tanks for domestic use in Greece. *Water Resources Management*, 29(12), 4357-4377. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1064-1>
- Palla, A., Gnecco, I., Lanza, L., & La Barbera, P. (2012). Performance analysis of domestic rainwater harvesting systems under various European climate zones. *Resources, Conservation and Recycling*, 62, 71-80. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.02.006>

- Sample, D. J., & Liu, J. (2014). Optimizing rainwater harvesting systems for the dual purposes of water supply and runoff capture. *Journal of Cleaner Production*, 75, 174-194.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.075>
- Shadeed, S., & Alawna, S. (2021). Optimal sizing of rooftop rainwater harvesting tanks for sustainable domestic water use in the West Bank, Palestine. *Water*, 13(4), 573.
<https://doi.org/10.3390/w13040573>
- Shapiro, S., & Wilk, M. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3/4), 591-611.
<https://doi.org/10.2307/2333709>
- Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. *ACM '68: Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference* (pp. 517-524).
<https://doi.org/10.1145/800186.8106>
- Tsihrintzis, V., & Baltas, E. (2013). *Sizing of rainwater harvesting tank for in-house water supply*. 13th International Conference on Environmental Science and Technology, Athens, Greece (pp. 5-7).
- Vieritz, A., Neumann, L., & Cook, S. (2015). Rainwater tank modelling. In: Sharma, A., Begbie, D., & Gardner, T. *Rainwater tank systems for urban water supply* (pp. 19-46). IWA Publishing.
<https://doi.org/10.2166/9781780405360>
- Villarreal, E., & Dixon, A. (2005). Analysis of a rainwater collection system for domestic water supply in Ringdansen, Norrköping, Sweden. *Building and Environment*, 40(9), 1174-1184.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.10.018>