



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA**

**“COSECHA DE LLUVIA EN VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL EN
ZACUALTIPÁN DE ÁNGELES, HIDALGO: VIABILIDAD TÉCNICA Y
SOCIAL PARA MITIGAR LA ESCASEZ HÍDRICA”**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN INGENIERÍA CIVIL**

PRESENTA:

ARTURO LARIOS GALVÁN

DIRECTORA DE TESIS:

DRA. LILIANA GUADALUPE LIZÁRRAGA MENDIOLA

CO-DIRECTOR:

DR. OMAR SALVADOR AREU RANGEL

MINERAL DE LA REFORMA. HIDALGO

2025





Mineral de la Reforma, Hgo., a 11 de junio de 2025

Número de control: ICBI-D/924/2025
Asunto: Autorización de impresión.

**MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH**

Con Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio, le comunico que el Jurado asignado al egresado de la Licenciatura en Ingeniería Civil **Arturo Larios Galván**, quien presenta el trabajo de titulación "**Cosecha de lluvia en viviendas de interés social en Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo: Viabilidad técnica y social para mitigar la escasez hídrica**", ha decidido, después de revisar fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; dicho trabajo en la reunión de sinodales, **autorizar la impresión del mismo**, una vez realizadas las correcciones acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

Presidente: Dr. Juan Carlos Seck Tuoh Mora

Secretario: Dra. Liliana Guadalupe Lizárraga Mendiola

Vocal: Dr. Carlos Alfredo Bigurra Alzati

Suplente: Dr. Omar Salvador Areu Rangel

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI

GVR/YCC



Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergarar@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



uaeh.edu.mx

Índice

Listado de figuras:.....	2
Listado de tablas:	3
Resumen	5
Abstract.....	6
Capítulo 1 Planteamiento de la investigación.....	7
1.1 Introducción.....	7
1.2 Problemática.....	8
1.3 Justificación	9
1.4 Objetivo general	10
1.4.1 Objetivos específicos	10
1.5 Hipótesis.....	11
1.6 Alcance y limitaciones.....	11
1.7 Descripción del área de estudio	11
1.7.1 Localización	11
1.7.2 Clima	12
1.7.3 Población	12
1.7.4 Características de la vivienda	14
Capítulo 2: Revisión de literatura y conceptos clave	17
2.1 Introducción.....	17
2.2 Contexto general del problema	17
2.3 Conceptos base para la investigación	18
2.4 Normativas y regulaciones.....	21
2.5 Estado del arte	26
2.5.1 Descripción general de la cosecha de lluvia en viviendas	26
2.5.2 Principales usos del agua de lluvia cosechada	28
2.5.3 Implementación exitosa de la cosecha de agua de lluvia en el mundo.....	29
2.5.4 Recomendaciones de tratamiento del agua	30
2.5.5 Potencial del volumen cosechable para mitigar la escasez hídrica en viviendas	31
2.6 Criterios técnicos del SCALL.....	33
2.6.1 Capacidad de la cosecha de agua de lluvia para mitigar la escasez	33
2.6.2 Indicadores que miden la eficiencia de la cosecha de lluvia.....	33

2.6.3 Eficacia de la cosecha de lluvia para reducir el desabasto doméstico de agua	35
Capítulo 3: Metodología.....	38
3.1 Introducción.....	38
3.2 Usos de suelo	38
3.3 Coeficientes de absorción y escorrentía	39
3.4 Características tipológicas de las viviendas	40
3.5 Selección de las precipitaciones de diseño	41
3.6 Volumen de agua de lluvia cosechable en azoteas.....	42
3.7 Adaptación de indicadores base	43
3.8 Diseño de indicadores para medir la viabilidad técnica del SCALL	44
Capítulo 4: Resultados y discusión.....	48
4.1 Introducción.....	48
4.2 Distribución de la lluvia en Zacualtipán de Ángeles.....	48
4.3 Volumen cosechable para autoconsumo doméstico	50
4.4 Indicadores base para evaluar la pertinencia del SCALL	51
4.5 El potencial del SCALL como alternativa al acarreo de agua	54
4.6 Discusión	57
4.6.1 Posibles limitaciones de la investigación	59
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones	61
5.1 Conclusiones.....	61
5.2 Recomendaciones	61
5.3 Futuras líneas de investigación	62
Referencias bibliográficas.....	63
Anexo 1	70

Listado de figuras:

Figura 1.1 Localización del municipio	12
Figura 1.2 Distribución en planta de la vivienda promedio y su instalación hidrosanitaria (en azul)	15
Figura 2.1 Esquema integral SCALL (CONAGUA, 2025)	27
Figura 3.1 Distribución uso de suelo en el área de estudio	39

Figura 3.2 Distribución geográfica de pozos y radios de acceso a pozos de agua en Zacualtipán de Ángeles.	45
Figura 4.1 Distribución mensual de las precipitaciones	48
Figura 4.2 Tendencia de las precipitaciones históricas (mm) en Zacualtipán de Ángeles	49
Figura 4.3 Precipitaciones mensuales máximas y con 75% de probabilidad de ocurrencia durante el año	50
Figura 4.4 Volúmenes de agua de lluvia cosechable en azoteas de viviendas	50
Figura 4.5 Volúmenes de agua de lluvia aprovechables para cubrir la dotación recibida en la vivienda (3.32 m ³ al mes, en promedio)	51
Figura 4.6 Distribución geográfica de pozos y radios de acceso a agua en Zacualtipán de Ángeles.	55

Listado de tablas:

Tabla 1.1. Datos demográficos del municipio (INEGI, 2020)	13
Tabla 1.2. Indicadores CONEVAL para Zacualtipán de Ángeles (CONEVAL, 2020)	13
Tabla 2.1. Comparativa de criterios técnicos para la implementación de SCALL en zonas semiáridas	23
Tabla 2.2 Aspectos que favorecen o limitan la implementación de un SCALL	29
Tabla 2.3. Tabla de usos recomendados y no recomendados	30
Tabla 2.4. Capacidad de cosecha de agua de lluvia por región	32
Tabla 2.5. Capacidad y cobertura de agua pluvial para consumo doméstico	36
Tabla 3.1. Coeficientes de absorción y escorrentía	40
Tabla 3.2. Superficies disponibles para cosechar la lluvia	40
Tabla 3.3. Volumen de agua requerido y suministrado	41
Tabla 3.4. Descripción general de los pozos de abastecimiento	45
Tabla 4.1. Cálculo del agua absorbida	52
Tabla 4.2. Cálculo del agua de lluvia cosechada en techos	52
Tabla 4.3. Cálculo del agua no utilizada	53
Tabla 4.4. Cálculo de agua necesaria y suministrada	53

Tabla 4.5. Aplicación de los indicadores base en la zona de estudio	53
Tabla 4.6. Índice de Variabilidad Temporal (IVT)	55
Tabla 4.7 Índice de Viabilidad por Distancia (IVD)	56
Tabla 4.8 Índice de Viabilidad por Distancia (IVD max)	57

Resumen

La escasez de agua en zonas urbanas constituye un desafío creciente en México y en países con condiciones similares, particularmente en contextos con infraestructura hidráulica obsoleta, rápido crecimiento urbano y vulnerabilidad socioeconómica. Esta investigación analiza la viabilidad técnica y social de implementar sistemas de cosecha de agua de lluvia (SCALL) en viviendas de interés social en Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, como estrategia sostenible para mitigar la escasez hídrica. Mediante una revisión de literatura científica y normativa, así como el análisis de datos hidrometeorológicos, socioeconómicos y urbanos de la localidad, se evaluó el potencial de captación de agua pluvial considerando la precipitación histórica promedio de 1,623.8 mm/año y las características constructivas de viviendas tipo con azoteas de 61 m². Se identificó que el SCALL podría cubrir hasta el 49.01% del consumo doméstico para usos no potables, reduciendo significativamente la dependencia del tandeo y del acarreo de agua desde fuentes externas. La metodología incluyó la aplicación de indicadores propuestos en otros estudios para cuantificar el volumen de agua cosechada, la infiltración potencial y el autoconsumo pluvial, además del diseño de dos nuevos indicadores que miden la eficiencia de captación efectiva y la reducción del acarreo. Los resultados muestran que la infraestructura actual satisface apenas el 33.6% de la demanda hídrica municipal, por lo que la implementación del SCALL en las viviendas representa una solución técnica viable y socialmente relevante. Se analizaron también las principales limitaciones, como la estacionalidad de las lluvias. Esta investigación concluye que, bajo condiciones adecuadas de diseño e implementación, los sistemas de cosecha de lluvia pueden convertirse en una herramienta eficaz para fortalecer la seguridad hídrica de comunidades vulnerables de México y contribuir a una gestión más sostenible del recurso hídrico en regiones semiáridas con infraestructura hidráulica y gestión del agua deficientes.

Palabras clave: Cosecha de agua de lluvia, seguridad hídrica, escasez hídrica urbana, gestión de agua en zonas semiáridas

Abstract

Water scarcity in urban areas represents a growing challenge in Mexico and countries with similar conditions, particularly in contexts characterized by obsolete hydraulic infrastructure, rapid urban growth, and socioeconomic vulnerability. This research analyzes the technical and social feasibility of implementing rainwater harvesting systems (RWHS) in social housing units in Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, as a sustainable strategy to mitigate water scarcity. Through a comprehensive review of scientific literature and regulatory frameworks, as well as the analysis of local hydrometeorological, socioeconomic, and urban data, the potential for rainwater collection was assessed considering a historical average precipitation of 1,623.8 mm per year and the construction characteristics of typical dwellings with 61 m² rooftops. The study identified that RWHS could cover up to 49.01% of domestic water consumption for non-potable uses, significantly reducing dependence on intermittent municipal supply (tandeo) and water hauling from external sources. The methodology included the application of indicators proposed in previous studies to quantify harvested water volume, potential infiltration, and rainwater self-consumption, as well as the design of two new indicators that measure effective harvesting efficiency and reduction of external water hauling. Results show that the current infrastructure satisfies only 33.6% of the municipal water demand; thus, implementing RWHS is a technically viable and socially relevant solution for local households. The main limitations were also analyzed, including seasonal rainfall. The research concludes that, under appropriate design and implementation conditions, rainwater harvesting systems can become an effective tool to strengthen water security for vulnerable Mexican communities and contribute to more sustainable water resource management in semi-arid regions with deficient infrastructure and poor water governance.

Keywords: Rainwater harvesting, water security, urban water scarcity, water management in semi-arid regions

Capítulo 1 Planteamiento de la investigación

1.1 Introducción

La escasez de agua en zonas urbanas es un problema creciente que afecta a millones de personas en el mundo, particularmente en regiones con rápido crecimiento poblacional y cambios climáticos adversos (Shadmehri Toosi et al., 2022; Zabidi et al., 2020). Entre los factores que contribuyen a esta crisis se encuentran la sobreexplotación de fuentes hídricas, el incremento de la demanda debido a la urbanización acelerada, la contaminación de cuerpos de agua y la ineficiencia en la gestión del recurso hídrico (Vardon et al., 2025). La falta de infraestructura adecuada o la obsolescencia de las redes de abastecimiento y distribución agravan aún más la escasez, generando un acceso desigual al agua potable y afectando principalmente a comunidades con menores ingresos (Castelán-Cabañas et al., 2024).

En este contexto, la cosecha de agua de lluvia se ha convertido en una alternativa sostenible para mitigar la escasez hídrica, especialmente en viviendas ubicadas en zonas donde la infraestructura hidráulica es deficiente (Sapkota et al., 2022). Por ejemplo, en Fremantle, Australia, la implementación de sistemas de captación de agua pluvial en viviendas permitió reducir hasta en un 50% la dependencia del suministro público, mejorando la seguridad hídrica de los habitantes (Vardon et al., 2025). De manera similar, en la Ciudad de México se ha identificado que los sistemas de captación pueden cubrir hasta el 40% de la demanda doméstica anual en zonas con precipitaciones superiores a 800 mm anuales, siempre que el almacenamiento sea adecuado (Castelán-Cabañas et al., 2024).

La adopción de estas soluciones es importante en viviendas de interés social en México, donde las condiciones de infraestructura pueden ser precarias y el acceso al agua potable es limitado. La descentralización del abastecimiento mediante la cosecha de lluvia no solo reduce la presión sobre las redes públicas, sino que también disminuye los costos para las familias de recursos limitados, quienes en muchas ocasiones deben recurrir a la compra de agua en pipas a precios elevados (Sapkota et al., 2022).

Este estudio tiene como objetivo analizar la viabilidad técnica de la implementación de sistemas de cosecha de lluvia en viviendas de interés social en zonas urbanas con infraestructura hidráulica ineficiente en México. Para ello, se revisarán estudios previos que han evaluado su impacto en la reducción de la escasez hídrica y se determinarán las condiciones óptimas de precipitación, almacenamiento y aprovechamiento del recurso pluvial. Finalmente, se identificarán indicadores que permitan medir el beneficio técnico de estos sistemas en las comunidades más vulnerables.

1.2 Problemática

Zacualtipán de Ángeles enfrenta importantes desafíos para garantizar un acceso equitativo y sostenible al agua, situación que se ve agravada por su clima templado y condiciones socioeconómicas adversas. La problemática se manifiesta en diversas áreas importantes:

Infraestructura deficiente y distribución ineficaz

El suministro de agua en la región depende de un sistema obsoleto, caracterizado por pérdidas significativas debido a fugas, que superan el 30% y reducen la disponibilidad del recurso para la población (CONAGUA, 2020). Además, el 22% de los hogares no cuenta con conexión a la red pública, obligando a sus habitantes a obtener agua de fuentes lejanas, como pozos y manantiales, lo que genera una carga desproporcionada sobre mujeres y niños (UNICEF, 2016; INEGI, 2020).

Escasa inversión en tecnologías sostenibles

A pesar de que Zacualtipán recibe un promedio anual de 1,200 mm de precipitación, el aprovechamiento de este recurso es mínimo. Menos del 10% de las viviendas disponen de sistemas de captación y almacenamiento de agua de lluvia, debido a la falta de capacitación técnica y la limitada disponibilidad de recursos económicos (CONEVAL, 2020). Esta situación mantiene la dependencia de fuentes externas y agrava la crisis hídrica durante los periodos de mayor demanda.

Crecimiento urbano desordenado

El desarrollo de nuevas zonas residenciales sobre áreas de recarga natural ha reducido la infiltración del agua en el suelo en un 25%, lo que produce el incremento de la escorrentía superficial y disminuye la disponibilidad de agua subterránea (INEGI, 2020). Esta alteración del ciclo hidrológico local compromete la sostenibilidad del abastecimiento en el mediano y largo plazo.

Contaminación de fuentes hídricas

La calidad del agua en Zacualtipán también representa un problema crítico. Se ha detectado que el 35% de los pozos y manantiales presentan concentraciones de coliformes fecales por encima de los límites establecidos en la NOM-127-SSA1-1994, debido a la deficiencia en el saneamiento básico y la falta de regulación en las prácticas agrícolas (SEDESOL, 2011; Medina-Rivas et al., 2022). Como consecuencia, muchas fuentes de abastecimiento no son aptas para el consumo humano, lo que incrementa los riesgos sanitarios y restringe aún más el acceso al agua potable. Estos factores muestran la necesidad de adoptar estrategias integrales que combinen infraestructura eficiente,

tecnologías sostenibles y una mejor planificación urbana para garantizar el acceso seguro al agua en Zacualtipán.

1.3 Justificación

Como se explicó en el apartado anterior, el acceso al agua en Zacualtipán de Ángeles es limitado debido a múltiples factores estructurales y ambientales. La infraestructura de abastecimiento es obsoleta, con pérdidas superiores al 30% por fugas, y una parte significativa de la población carece de conexión a la red pública, dependiendo de fuentes externas poco confiables (CONAGUA, 2020; INEGI, 2020). Además, el crecimiento urbano desordenado ha reducido la infiltración natural del agua en un 25%, afectando la recarga de los acuíferos locales y disminuyendo la disponibilidad de agua subterránea (INEGI, 2020). Ante este escenario, es importante y necesaria la adopción de estrategias sostenibles como la cosecha de lluvia para mitigar la crisis hídrica en la región.

Por medio de una revisión de literatura se resalta que la captación de agua pluvial es una solución efectiva en contextos urbanos con infraestructura deficiente. En ciudades con condiciones climáticas similares, como Fremantle, Australia, la implementación de sistemas de captación en viviendas permitió reducir hasta en un 50% la dependencia del suministro público (Vardon et al., 2025). En la Ciudad de México, estos sistemas han demostrado ser capaces de cubrir hasta el 40% de la demanda doméstica anual en zonas con precipitaciones superiores a 800 mm/año, siempre que exista un almacenamiento adecuado (Castelán-Cabañas et al., 2024). Zacualtipán cuenta con un promedio anual de 1,200 mm de precipitación, lo que indica un alto potencial para el aprovechamiento de este recurso (CONEVAL, 2020).

La implementación de sistemas de captación de lluvia (SCALL) en viviendas de interés social en Zacualtipán no solo contribuiría a reducir la presión sobre la infraestructura hídrica existente, sino que también generaría beneficios socioeconómicos significativos. En otras regiones con problemas similares, estos sistemas han disminuido los costos asociados a la compra de agua y han mejorado la seguridad hídrica de las familias más vulnerables (Sapkota et al., 2014). Además, al reducir la dependencia de fuentes externas, se minimiza el impacto de la contaminación en los manantiales y pozos locales, donde el 35% presenta niveles elevados de coliformes fecales, restringiendo su uso seguro para consumo humano (SEDESOL, 2011; Medina-Rivas et al., 2022).

En síntesis, la cosecha de agua de lluvia representa una alternativa viable y sostenible para mitigar la problemática de desabasto en Zacualtipán. Su implementación permitiría mejorar la disponibilidad del recurso hídrico, reducir costos para la población y contribuir a la conservación de los acuíferos locales. Dado el alto potencial de precipitación en la zona, es necesario promover políticas y programas que incentiven la adopción de estos sistemas, facilitando el acceso a tecnologías de almacenamiento y capacitación técnica para garantizar su efectividad a largo plazo.

1.4 Objetivo general

Analizar y evaluar la viabilidad técnica y social de la implementación de sistemas de cosecha de lluvia en viviendas de interés social en Zacualtipán de Ángeles, como una estrategia para mitigar la escasez hídrica derivada de la infraestructura hidráulica obsoleta, el crecimiento urbano desordenado y la contaminación de fuentes locales.

1.4.1 Objetivos específicos

1. Evaluar la disponibilidad y el potencial de captación de agua de lluvia en Zacualtipán, considerando los registros históricos de precipitación y las condiciones geográficas de la región.
2. Identificar los principales factores que limitan el acceso al agua potable en la población, incluyendo la deficiencia de infraestructura y la falta de alternativas sostenibles.
3. Determinar el impacto de los sistemas de captación de agua de lluvia en otras ciudades con condiciones climáticas y socioeconómicas similares, mediante una revisión de casos de estudio exitosos a nivel nacional e internacional.
4. Cuantificar los beneficios sociotécnicos de la implementación de la cosecha de lluvia en viviendas de interés social en Zacualtipán, considerando indicadores como la reducción de la dependencia de la red de abastecimiento local en los hogares y el acceso equitativo al recurso hídrico.
5. Proponer estrategias de implementación que fomenten la adopción de la cosecha de agua de lluvia en la región, estableciendo lineamientos técnicos y recomendaciones para su implementación y sostenibilidad a largo plazo.
6. Diseñar dos indicadores para evaluar la viabilidad técnica de aprovechar el agua de lluvia cosechada en azoteas para cubrir parcialmente la demanda de autoconsumo en viviendas con escasez hídrica y tandeo, reduciendo así la dependencia del acarreo de agua desde fuentes externas.

1.5 Hipótesis

La implementación de sistemas de cosecha de lluvia en viviendas de interés social en Zacualtipán de Ángeles contribuirá significativamente a mitigar la escasez hídrica, al proporcionar una fuente alternativa de abastecimiento que reduzca la dependencia de redes públicas deficientes y fuentes contaminadas. Se espera que estos sistemas mejoren la disponibilidad de agua en los hogares beneficiados y reduzcan la presión sobre los acuíferos locales, favoreciendo la sostenibilidad hídrica y el bienestar social en la comunidad.

1.6 Alcance y limitaciones

Este estudio evaluará la viabilidad técnica y social de la implementación de sistemas de cosecha de lluvia en viviendas de interés social en Zacualtipán de Ángeles, con base en información del censo de población y datos sobre infraestructura hidráulica. Se analizarán los beneficios potenciales de estos sistemas para la población representativa que habita en estas viviendas, considerando el acceso equitativo al agua, la reducción de la dependencia de la red pública y los impactos técnicos y sociales en los hogares. Además, se estudiarán casos de éxito en otras regiones con condiciones climáticas y socioeconómicas similares para extraer estrategias de implementación adaptables al contexto local.

Sin embargo, esta investigación tiene limitaciones que deben tenerse en cuenta. Los datos utilizados provendrán de fuentes secundarias, como registros del censo y estudios previos, lo que implica que la precisión del análisis dependerá de la actualización y disponibilidad de la información. Asimismo, la evaluación de los beneficios sociotécnicos se basará en estimaciones teóricas, ya que no se realizará una implementación piloto en Zacualtipán para validar los resultados en campo. Finalmente, aunque se formularán lineamientos para la adopción de estos sistemas, su ejecución dependerá de factores externos, como la disponibilidad de financiamiento y la aceptación por parte de la comunidad y las autoridades locales.

1.7 Descripción del área de estudio

1.7.1 Localización

Zacualtipán de Ángeles es un municipio ubicado en el estado de Hidalgo, México, en la región central de la Sierra Madre Oriental. Sus coordenadas geográficas son 20°38'38" de latitud norte y 98°34'11" de longitud oeste, situándose a una distancia aproximada de 140 km al noreste de la capital estatal, Pachuca, y 200 km al norte de la Ciudad de México (Figura 1.1). El municipio abarca una superficie total de 272.71 km², lo que representa el 1.31% del territorio estatal, y se extiende en una zona montañosa caracterizada por valles inter montanos y cañadas profundas.



Figura 1.1 Localización del municipio (sin escala)

1.7.2 Clima

La zona de estudio presenta un clima templado subhúmedo, según la clasificación climática modificada de Köppen (García, 2004). La temperatura media anual oscila entre 14°C y 18°C, con una marcada estacionalidad. El mes más frío es enero, con temperaturas mínimas que pueden descender hasta 3°C, mientras que el mes más cálido es mayo, con temperaturas máximas promedio de 24°C (SMN, 2021).

La precipitación anual total alcanza los 1,200 mm. De esta lluvia, la mayor parte se concentra en la temporada de lluvias, que abarca de junio a septiembre, representando aproximadamente el 80% del total anual. Septiembre es el mes más lluvioso, con un promedio de 75.85 mm de lluvia, seguido de octubre con 52.72 mm. En contraste, durante la temporada seca, de diciembre a marzo, las precipitaciones son mucho menores, registrándose menos de 40 mm. Febrero es el mes más seco, con solo 11.19 mm (SMN, 2020).

La zona se caracteriza por su relieve montañoso, con altitudes que superan los 2,000 m.s.n.m., lo que favorece la formación de microclimas y aumentos locales en la humedad relativa. Durante el invierno, son frecuentes las heladas y neblinas matutinas, mientras que en primavera se observan vientos moderados del noreste (INEGI, 2020).

1.7.3 Población

De acuerdo con los resultados del Censo de Población y Vivienda 2020 realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020), la población total de

Zacualtipán de Ángeles asciende a 38,155 habitantes, de los cuales 16,699 son hombres (47.5%) y 18,457 son mujeres (52.5%). La densidad poblacional es de 139.9 habitantes por kilómetro cuadrado, distribuidos en 33 localidades, siendo la cabecera municipal la más poblada (INEGI, 2020) (Tabla 1.1).

Tabla 1.1 Datos demográficos del municipio (INEGI, 2020)

Descripción	Cantidad
Población total (2020)	38,155 habitantes
Número de viviendas	≈10,594 viviendas
Personas por vivienda	3.6
Población en zona habitacional urbana	≈90% (34,340 hab.)

Según los indicadores publicados por el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL, 2020), Zacualtipán de Ángeles presenta un grado de rezago social alto, con carencias críticas en acceso a servicios básicos. A continuación, se resumen los principales indicadores socioeconómicos (Tabla 1.2):

Tabla 1.2 Indicadores CONEVAL para Zacualtipán de Ángeles (CONEVAL, 2020)

Indicador	No	Indicador	No
Población sin derechohabencia a servicios de salud	13,852	Viviendas con piso de tierra	255
Viviendas que no disponen de drenaje	223	Viviendas que no disponen de energía eléctrica	106
Viviendas sin agua entubada de la red pública	4153	Índice de rezago social	1.24

Como se indicó en la Tabla 1.2, el índice de rezago social (IRS) en Zacualtipán de Ángeles, según la CONEVAL (2020), indica un nivel significativo de rezago en términos de acceso a servicios básicos, educación, vivienda y calidad de vida. Un índice positivo refleja mayores carencias, lo que sugiere desafíos importantes en el desarrollo social y la necesidad de intervenciones para mejorar las condiciones de bienestar de la población.

1.7.4 Características de la vivienda

El tipo de vivienda que se seleccionó para analizar en el proyecto es una vivienda de interés social, la cual equivale a un 75.51% (8,000) de las viviendas que se encuentran en el municipio y, por lo tanto, es la que predomina (CONEVAL, 2020). Este tipo de vivienda se considera representativa de las condiciones socioeconómicas de la región. A continuación, se describen datos base del proyecto:

Diseño básico:

Superficie del terreno: 91 m²

Superficie construida: 61 m²

Superficie de azotea: 61 m²

Distribución: Sala-comedor integrado, 2 habitaciones, cocina básica, baño funcional, lavadero.

Materiales: Muros de block, techo de losa de concreto con pendiente del 2% y pisos de cemento pulido o loseta.

En la figura 1.2 se muestra la distribución en planta de la vivienda, así como su instalación hidrosanitaria.

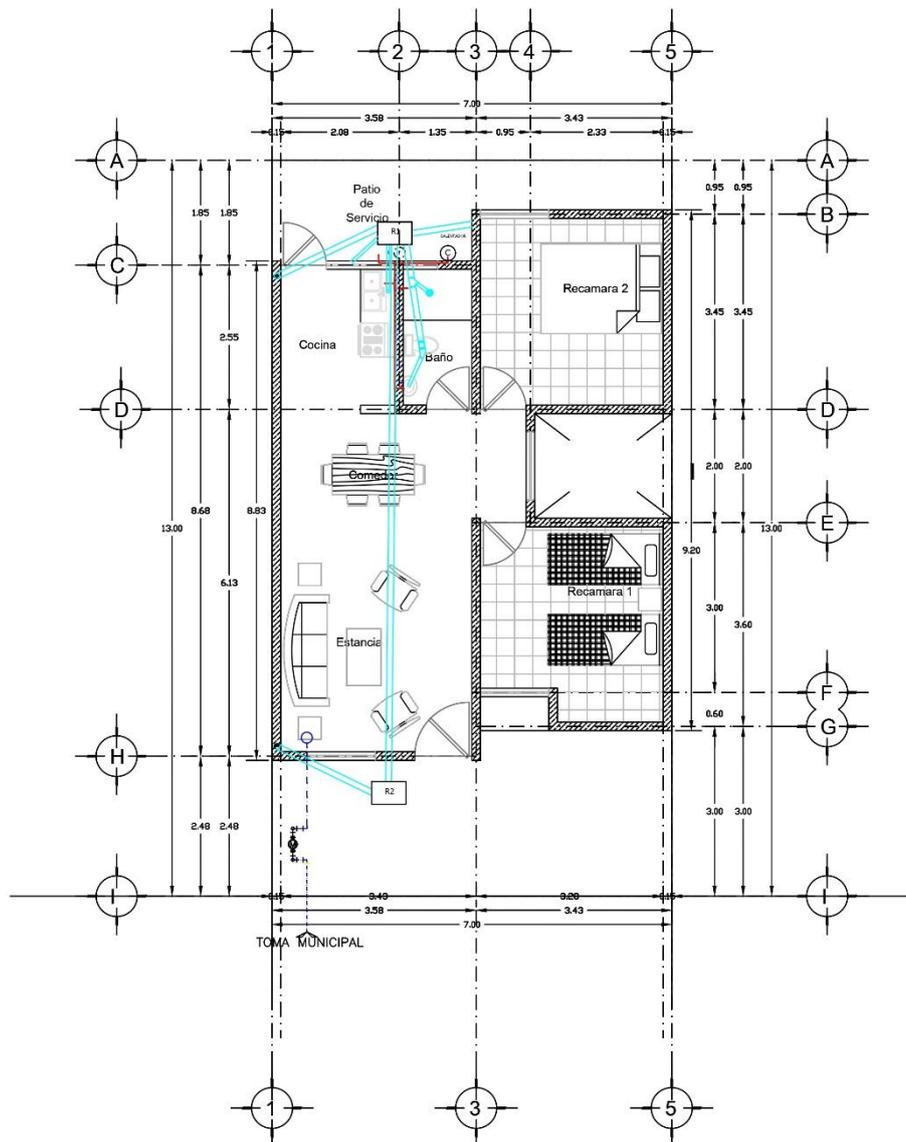


Figura 1.2 Distribución en planta de la vivienda promedio y su instalación hidrosanitaria (en azul)

En síntesis, el análisis de las condiciones constructivas y espaciales de la vivienda tipo estudiada —con techos de concreto de 61 m^2 , una pendiente del 2% y una distribución funcional— demuestra su idoneidad para la implementación de sistemas de cosecha de agua de lluvia (SCALL). Estas características garantizan una superficie de captación eficiente y disponibilidad de espacios para almacenamiento. Además, la amplia distribución de este modelo habitacional en la zona de estudio, sumada a las

problemáticas hídricas documentadas —como el suministro intermitente (tandeo) y la necesidad de acarrear agua—, refuerza la pertinencia de esta propuesta. Su aplicación podría impactar positivamente en miles de familias, optimizando su acceso al recurso hídrico y reduciendo costos asociados. Estos hallazgos establecen un sustento técnico y social que justifica, en el siguiente capítulo, el análisis de los fundamentos teóricos y casos exitosos de cosecha de lluvia en entornos urbanos con condiciones análogas.

Capítulo 2: Revisión de literatura y conceptos clave

2.1 Introducción

La escasez de agua en zonas urbanas es un problema creciente, agravado por el crecimiento poblacional, la sobreexplotación de acuíferos y la obsolescencia de la infraestructura hidráulica (Shadmehri Toosi et al., 2021; Castelán-Cabañas et al., 2024). La cosecha de lluvia surge como una alternativa sostenible para reducir la dependencia de las redes de abastecimiento convencionales, especialmente en ciudades con infraestructura insuficiente o deteriorada (Sapkota et al., 2014). Implementada correctamente, esta estrategia permite la captación y almacenamiento de agua pluvial para usos domésticos, promoviendo el autoconsumo y mejorando la seguridad hídrica en comunidades vulnerables (Zabidi et al., 2020). Su integración en infraestructuras híbridas, combinando sistemas de cosecha de lluvia con redes hidráulicas convencionales, representa una estrategia clave para la resiliencia hídrica urbana en contextos de cambio climático y rápida urbanización.

2.2 Contexto general del problema

El desabasto de agua en viviendas es un problema recurrente en muchas regiones urbanas, especialmente en aquellas con infraestructura hidráulica insuficiente. Shadmehri Toosi et al. (2020) destacan que la falta de sistemas adecuados de distribución de agua, sumado al crecimiento urbano descontrolado, provoca que muchas comunidades dependan del tandeo para recibir agua en sus viviendas. De manera similar, Vardon et al. (2025) subrayan que, a nivel global, la gestión ineficaz del agua y la escasez de recursos hídricos impactan negativamente en la calidad de vida de las poblaciones vulnerables. Ante este escenario, la cosecha de lluvia se considera una alternativa sostenible para mitigar el desabasto, ya que permite captar, almacenar y utilizar el agua de lluvia para el autoconsumo. Zabidi et al. (2020) argumentan que el uso de superficies urbanas, como las azoteas, ofrece una oportunidad valiosa para maximizar la retención de agua pluvial, reduciendo así la presión sobre las redes de distribución convencionales.

En cuanto a los alcances de la implementación de la cosecha de lluvia en azoteas para el consumo doméstico, los estudios revisados sugieren que se requiere una precipitación mínima de aproximadamente 50 mm al mes para que el sistema sea viable, considerando una eficiencia de captación del 80% (Castelán-Cabañas et al. 2024). Asimismo, se estima que, en una vivienda de interés social con una azotea de 50 metros cuadrados, se podría recolectar hasta 2,000 litros de agua al mes en condiciones favorables, lo cual podría cubrir entre el 30% y el 50% del consumo promedio de una familia de cuatro personas, dependiendo de sus hábitos de uso del agua (Zabidi et al. 2020). Estos datos son consistentes con las recomendaciones de la literatura, que sugieren que un sistema de cosecha de lluvia bien diseñado podría proporcionar agua suficiente para actividades no

potables como el riego y la limpieza, y en algunos casos, para el consumo humano si se aplica un tratamiento adecuado (Vardon et al. 2025).

La capacidad de estas estrategias para mitigar el desabasto es significativa. Shadmehri Toosi et al. (2020) mencionan que la implementación de tecnologías de bajo costo y fácil mantenimiento, como la cosecha de lluvia, no solo contribuye a la autosuficiencia hídrica de las viviendas, sino que también reduce la demanda sobre las redes de agua municipales, especialmente en periodos de sequía. Además, Castelán-Cabañas et al. (2024) destacan que la adaptación de infraestructuras urbanas existentes, como las azoteas, representa un enfoque eficaz para aumentar la resiliencia hídrica en comunidades que dependen del tandeo.

En cuanto a los aspectos no cubiertos en anteriores investigaciones, se identificó que, aunque hay autores como Shadmehri Toosi et al. (2020) y Vardon et al. (2025), quienes abordan la problemática del acceso al agua en contextos urbanos con infraestructura deficiente, ninguno de los estudios profundiza en la evaluación específica del potencial de las azoteas de viviendas de interés social para la cosecha de lluvia con fines de autoconsumo. Además, mientras Zabidi et al. 2020 discuten el uso de superficies urbanas para la retención de agua, su enfoque se centra en techos verdes y no en sistemas de captación directa para abastecimiento doméstico. Asimismo, Castelán-Cabañas et al. (2024) destacan las soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua, pero no abordan la cuantificación del impacto que podría tener la cosecha de lluvia en la reducción de la dependencia del tandeo en comunidades específicas.

Otro vacío crítico es la falta de estudios que proporcionen indicadores claros y cuantificables para medir el éxito de estas estrategias en términos de agua captada y su contribución al consumo promedio de las viviendas, o en la mitigación de la dependencia de sistemas informales de provisión de agua (como el acarreo en pipas o en cubetas desde alguna fuente de agua disponible). Esta propuesta de investigación contribuye a llenar estos vacíos al enfocarse en el desarrollo de un análisis para evaluar el potencial de las azoteas de viviendas de interés social para la cosecha de lluvia en Zacualtipán de Ángeles, en el estado de Hidalgo, considerando factores como la precipitación mínima necesaria, la eficiencia de captación y el posible porcentaje de autoconsumo que se podría lograr. Además, se emplean indicadores urbanos que permiten cuantificar no solo la cantidad de agua recolectada, sino también su impacto directo en la reducción de la demanda del sistema municipal y en la mejora de la resiliencia hídrica de la población afectada. Al abordar estas áreas no exploradas previamente, este estudio no solo complementa los hallazgos de investigaciones anteriores, sino que también ofrece una contribución práctica y aplicable para la solución del desabasto de agua en zonas con infraestructura insuficiente y población en condiciones de vulnerabilidad.

2.3 Conceptos base para la investigación

Cosecha de lluvia

La cosecha de lluvia consiste en un sistema de captación, almacenamiento y aprovechamiento del agua pluvial para diversos usos, que ayuda a reducir la dependencia de fuentes convencionales de abastecimiento de agua. En contextos urbanos con estrés hídrico, su implementación ha demostrado mejorar la seguridad hídrica en viviendas de interés social y reducir la sobreexplotación de acuíferos (Castelán-Cabañas et al., 2024). Estudios en Irán, China y África han demostrado que estos sistemas pueden garantizar el acceso al agua en zonas con disponibilidad limitada y suministro irregular (Shadmehri Toosi et al., 2021).

Autoconsumo de agua para uso doméstico

El agua recolectada a través de la cosecha de lluvia puede destinarse a consumo doméstico, ya sea para higiene, limpieza o incluso para beber, tras un adecuado tratamiento. En México, en zonas con infraestructura hidráulica ineficiente, la cosecha de lluvia permite reducir la dependencia del tandeo y garantizar el acceso al agua durante periodos de escasez (Sapkota et al., 2014). En otros países con economías diferentes, como Australia, se ha registrado que estos sistemas pueden suplir hasta el 80% del consumo de agua no potable en viviendas urbanas (Vardon et al., 2025).

Escasez hídrica

La escasez hídrica se refiere a la condición en la que la demanda de agua supera la disponibilidad del recurso, ya sea por factores naturales o antrópicos. El crecimiento descontrolado de la población, la contaminación y el cambio climático han intensificado la escasez en ciudades del Sur Global (Zabidi et al., 2020). En México, aproximadamente el 45% del territorio sufre de estrés hídrico severo, afectando a más de 12 millones de personas con acceso intermitente al agua potable (Castelán-Cabañas et al., 2024).

Infraestructura híbrida

La infraestructura híbrida se concibe como la combinación de infraestructura gris (redes de abastecimiento y drenaje convencionales) con soluciones basadas en la naturaleza, como la cosecha de lluvia y los sistemas de infiltración. La implementación de infraestructura híbrida permite una gestión más eficiente del agua, evitando la sobrecarga de los sistemas de drenaje y reduciendo la escasez hídrica en zonas urbanas (Jamali et al., 2021).

Sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL)

Estos sistemas incluyen techos captadores, canaletas, filtros, tanques de almacenamiento y sistemas de potabilización. En Mashhad, Irán, donde presentan precipitaciones escasas, estos sistemas han reducido en un 35% la dependencia del agua subterránea (Ortiz et al., 2022), por lo que internacionalmente, es una opción muy utilizada como estrategia sostenible de aprovechamiento del agua en condiciones de escasez. En la Ciudad de México, estudios han demostrado que un SCALL bien diseñado puede cubrir entre el 40 y 60% del consumo de agua en una vivienda de interés social (Eakin et al., 2016). Hasta 2024, el gobierno de la Ciudad de México contaba con un programa de cosecha de lluvia, donde se realizaba la transferencia de tecnología a los usuarios por medio de la instalación de SCALL a población con vulnerabilidad (SEDEMA, 2024). Lo anterior refleja no solamente que este tipo de soluciones basadas en la naturaleza genera un sentido de apropiación y aceptación social.

Resiliencia hídrica urbana

La resiliencia hídrica urbana se refiere a la capacidad de las ciudades para adaptarse y responder a crisis hídricas mediante estrategias sostenibles. La integración de sistemas descentralizados, como la cosecha de lluvia, ha demostrado aumentar la resiliencia de comunidades vulnerables, especialmente en zonas con infraestructura deficiente (Jamali et al., 2021).

Eficiencia hídrica

Este concepto refleja la optimización en el uso y reaprovechamiento del agua para reducir desperdicios y mejorar su disponibilidad. Se han documentado casos en los que la cosecha de lluvia puede disminuir en un 25% la extracción de agua subterránea y reducir la carga sobre los sistemas municipales (Valdez et al., 2016).

Zonas urbanas con infraestructura hidráulica obsoleta

Muchas ciudades latinoamericanas tienen redes de abastecimiento envejecidas, con pérdidas de agua superiores al 40% antes de llegar al usuario final (Castelán-Cabañas et al., 2024). Esto exacerba la crisis hídrica y aumenta la dependencia de soluciones descentralizadas como la cosecha de lluvia.

Cambio climático y estrés hídrico

El aumento en la variabilidad climática ha generado periodos de sequía más prolongados, afectando la disponibilidad de agua en ciudades. La cosecha de lluvia se ha identificado

como una medida de adaptación muy apropiada, ya que permite almacenar agua en temporadas de alta precipitación para su uso en tiempos de sequía (Ortiz et al., 2022).

Viviendas de interés social y acceso al agua

En México, las viviendas de interés social –aquellas con superficies igual o menores a 60 m² y costos accesibles para población de bajos ingresos– son especialmente vulnerables a la escasez hídrica. Según el INFONAVIT (2023), este tipo de viviendas representa el 42% del parque habitacional nacional, y en el estado de Hidalgo alcanzan el 37% del total, concentrándose en municipios con alta marginación como Zacualtipán de Ángeles. A esto se suma que, de acuerdo con la Sociedad Hipotecaria Federal (2014), solo el 18% de las viviendas sociales en el país cuenta con infraestructura hídrica resiliente, mientras que en Hidalgo la cifra desciende al 12%, según datos del Programa de Vivienda Social Sustentable (Sociedad Hipotecaria Federal, 2014).

Esta precariedad se agudiza en zonas como Zacualtipán de Ángeles, donde el 89% de las viviendas depende de sistemas de abastecimiento intermitentes (INEGI, 2020), un fenómeno vinculado a la falta de inversión en redes de distribución y al estrés hídrico regional. Por lo anterior, estrategias como la cosecha de lluvia han demostrado ser una alternativa viable no solo para garantizar el acceso al agua, sino también para reducir costos económicos en hogares que destinan hasta el 15% de sus ingresos a la compra de pipas (CONAGUA, 2023). Además, su implementación masiva podría alinearse con los criterios de CONAVI para vivienda sostenible (Sociedad Hipotecaria Federal, 2014), que priorizan tecnologías de captación pluvial en municipios con disponibilidad hídrica menor a 1,500 m³/hab/año, como es el caso de Zacualtipán (1,200 m³/hab/año) (SMN, 2024).

2.4 Normativas y regulaciones

La implementación de SCALL en viviendas situadas en regiones semiáridas de países de Latinoamérica y en México, ha sido objeto de diversas guías técnicas, reglamentos y normas. A continuación, se presentan los documentos que se consideraron más relevantes para esta investigación, ya que abordan criterios para su implementación y especifican los usos permitidos del agua recolectada en zonas con condiciones socioeconómicas y climatológicas similares:

Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia en zonas áridas y semiáridas en América Latina

Este manual de la FAO (2000) contiene lineamientos prácticos para la implementación de sistemas de captación de agua de lluvia en zonas áridas y semiáridas de América Latina. Entre los criterios base para considerar viable su instalación, deben tomarse en

cuenta la evaluación de la precipitación anual, la capacidad de almacenamiento y la calidad del agua recolectada. Las principales restricciones incluyen el costo inicial, la necesidad de un mantenimiento regular y las limitaciones técnicas según el tipo de suelo y el clima.

Captación y almacenamiento de agua de lluvia

Este manual (JICA y PNUMA, 2000) proporciona directrices sobre cómo captar y almacenar agua de lluvia, destacando su uso en la producción agrícola y actividades domésticas. Entre los criterios básicos recomendados para implementar un SCALL incluyen la evaluación de la precipitación, la superficie de captación, el tipo de suelo y las condiciones de vegetación. Se recomienda que el sistema sea sencillo y económico, adaptado a la producción agrícola y usos domésticos. Sus principales restricciones son la variabilidad climática, los costos iniciales y la necesidad de un mantenimiento adecuado.

Manual de capacitación en agricultura orgánica para los trópicos áridos y semiáridos

Para implementar un SCALL en zonas semiáridas, es fundamental evaluar la precipitación anual, garantizar una capacidad de almacenamiento adecuada y aplicar estrategias que conserven el agua y reduzcan la evaporación (IFOAM, 2004). Este manual sugiere utilizar coberturas vegetales, técnicas de riego eficiente y métodos para captar el agua de escorrentía, optimizando así la infiltración. Sin embargo, factores como la baja precipitación, el mantenimiento constante, los altos costos iniciales y la vulnerabilidad del suelo pueden limitar su efectividad, especialmente ante la variabilidad climática y las elevadas tasas de evaporación.

A continuación, se sintetizan algunos de los principales criterios técnicos considerados en estos manuales internacionales (Tabla 2.1):

Tabla 3.1 Comparativa de criterios técnicos para la implementación de SCALL en zonas semiáridas

Criterio	Manual FAO (2000)	Manual JICA y PNUMA (2000)	Manual IFOAM (2004)
Precipitación recomendada	> 300 mm anuales	> 250 mm anuales	> 200 mm anuales
Tipos de superficie de captación	Azoteas impermeables, techos de lámina y teja	Techos de zinc, lámina, concreto	Techos de teja, lámina, superficies inclinadas

Pendiente de las azoteas	5-15% para facilitar el flujo de agua	10-20% para evitar estancamientos	5-10% con canaletas adaptadas
Recomendaciones de instalación	Uso de canaletas y filtros para reducir sedimentos	Prefiltro de malla, tanques de almacenamiento elevados	Uso de coberturas vegetales y filtros naturales
Recomendaciones de mantenimiento	Limpieza de azoteas y canaletas antes de cada temporada de lluvias	Revisar y limpiar filtros mensualmente	Mantener las superficies libres de hojas y suciedad

La Tabla 2.1 muestra que, aunque los tres manuales técnicos coinciden en la importancia de la pendiente y el mantenimiento regular de los SCALL, también existen diferencias en los criterios mínimos de precipitación y en las recomendaciones de instalación. Mientras que el manual de la FAO (FAO, 2000) sugiere una precipitación mínima de 300 mm anuales, el manual de IFOAM (IFOAM, 2004) permite la implementación en regiones con tan solo 200 mm anuales. Las estrategias de mantenimiento y los tipos de superficie de captación también varían, lo que evidencia la necesidad de adaptar las recomendaciones al contexto local y a las condiciones climáticas específicas.

Por otra parte, en México, hay distintos documentos de aplicación nacional o estatal, donde se establecen lineamientos claros que pueden aplicarse en distintas partes del país. A continuación, se sintetizan algunos de los principales elementos que se tomaron en cuenta en esta investigación:

Lineamientos técnicos: SCALL con fines de abasto de agua potable a nivel vivienda

En este documento se especifica que, para implementar un SCALL, es esencial contar con una superficie impermeabilizada y una pendiente mínima del 2% para facilitar el flujo del agua (CONAGUA 2025). Se permiten materiales de captación como techos metálicos, plásticos, concreto y lámina corrugada, siempre que no liberen contaminantes. El tanque de almacenamiento debe ser hermético y accesible para mantenimiento, y el agua debe desinfectarse mediante cloración, plata coloidal o sistemas avanzados. Las principales restricciones incluyen la necesidad de espacio suficiente, mantenimiento regular, capacitación del usuario y cumplimiento de normativas locales y nacionales, como la NOM-001-CONAGUA-2011 y la NOM-244-SSA1-2020.

Ley de Aguas del Distrito Federal

Esta ley mexicana establece la obligatoriedad de instalar sistemas de captación de agua de lluvia en nuevas edificaciones y promueve su uso para consumo humano y actividades (Congreso de la Ciudad de México, 2020). Esta ley destaca que es necesario evaluar la disponibilidad de agua pluvial, diseñar infraestructura adecuada para su captación y almacenamiento, y asegurar procesos de potabilización para usos domésticos, priorizando su instalación en áreas con suministro irregular de agua potable. Las principales restricciones que se mencionan incluyen la necesidad de espacio para la infraestructura, costos de instalación y mantenimiento, el cumplimiento de las normas de calidad del agua y la capacitación para un uso seguro y eficiente del agua captada.

Manual para instalar un sistema de captación pluvial en tu vivienda

Para implementar un SCALL, este manual recomienda un clima con al menos 400 mm de precipitación anual, ya que en zonas áridas los resultados son limitados (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México et al., 2020). Los techos ideales para la captación deben ser lisos, limpios y con una pendiente mínima del 2%, usando materiales como lámina metálica, tejas cerámicas y losas de concreto. El sistema debe incluir canaletas, tuberías, un tanque hermético y un proceso de desinfección. Se requiere espacio suficiente, mantenimiento anual, capacitación del usuario y cumplimiento de normativas locales.

Guía de uso eficiente del agua en desarrollos habitacionales

Esta guía establece que los criterios básicos para implementar un SCALL incluyen contar con techos lisos y limpios, una pendiente mínima del 2% y materiales de captación adecuados, como lámina metálica, tejas cerámicas y concreto pulido (CONAFOVI, 2005). El sistema debe incluir canaletas, tuberías de conducción, un sistema de filtración y un tanque de almacenamiento hermético. Las restricciones principales son la necesidad de espacio suficiente, mantenimiento regular, capacitación del usuario y cumplimiento de las normativas locales.

Integración de criterios internacionales y nacionales para la implementación eficiente de SCALL en México

En México, los documentos normativos, como la Ley de Aguas del Distrito Federal y los Lineamientos Técnicos para Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL), establecen criterios técnicos detallados para garantizar la calidad y cantidad del agua captada, promoviendo su uso para consumo humano y actividades domésticas. Estos lineamientos incluyen la obligatoriedad de instalar SCALL en nuevas edificaciones, especificaciones para el diseño, construcción y mantenimiento de los sistemas, así como incentivos económicos y en especie para quienes adopten estas prácticas sostenibles.

Sin embargo, al complementar estos criterios con las recomendaciones de manuales internacionales, esta investigación se enriquece al incorporar enfoques adicionales que permiten ampliar la aplicabilidad de los SCALL en contextos diversos. Los documentos internacionales suelen enfocarse en la adaptabilidad de los sistemas a las condiciones climáticas específicas de las regiones semiáridas y en el uso del agua captada para actividades agrícolas y no potables, lo cual no siempre se encuentra detallado en la normativa mexicana. Además, estos manuales promueven prácticas que maximizan la eficiencia del sistema, como el uso de tecnologías de filtración avanzadas y estrategias de conservación del agua en el entorno doméstico y agrícola.

En conclusión, incluir estos criterios internacionales permite a esta investigación proponer un enfoque más integral y adaptable para la implementación de SCALL en México, especialmente en zonas con variabilidad climática y desafíos específicos en la gestión del agua, como es el caso de Zacualtipán de Ángeles. Al aplicar buenas prácticas globales, se pueden optimizar los sistemas actuales, no solo cumpliendo con las regulaciones nacionales, sino también superando las limitaciones establecidas, logrando una mayor sostenibilidad y eficiencia en el manejo del recurso hídrico.

2.5 Estado del arte

En este análisis se presenta una revisión de los sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL) aplicados en diversas regiones del mundo, con un enfoque particular en cómo se adaptan a diferentes contextos socioeconómicos, climatológicos y de eficiencia técnica.

2.5.1 Descripción general de la cosecha de lluvia en viviendas

La cosecha de lluvia en viviendas (RWH, por sus siglas en inglés) es un sistema descentralizado que capta, almacena y utiliza agua de lluvia recolectada principalmente de techos y otras superficies impermeables para fines domésticos, como riego, lavado o descarga de inodoros (Severis et al., 2019; Campisano et al., 2017). Su implementación busca reducir la dependencia de fuentes tradicionales de agua, mitigar la escasez hídrica y promover la sostenibilidad (Semaan et al., 2020; Khanal et al., 2023).

Componentes del sistema de captación de agua de lluvia (SCALL)

Los autores, y organizaciones como CONAGUA (2025; Figura 2.1), coinciden en que un sistema SCALL típico incluye:

- Superficie de captación: Techos de materiales lisos e impermeables (zinc, asfalto) que favorecen la escorrentía (Zabidi et al., 2020; Puppala et al., 2023).
- Sistema de conducción: Canaletas y tuberías que transportan el agua hacia el almacenamiento (Słyś y Stec, 2020; Ortiz et al., 2022).
- Pretratamiento: Filtros o dispositivos de "primer lavado" para eliminar contaminantes iniciales (hojas, heces de aves) (Latif et al., 2022; Leveque et al., 2024).
- Almacenamiento: Tanques o cisternas (plástico, concreto) dimensionados según demanda y precipitación local (Semaan et al., 2020; Belmeziti, 2024).
- Tratamiento adicional: Filtración o desinfección (cloración) para usos potables (opcional) (Alim et al., 2020).
- Distribución: Por gravedad o bombeo hacia puntos de uso (Ursino, 2016; Sheikh, 2020).

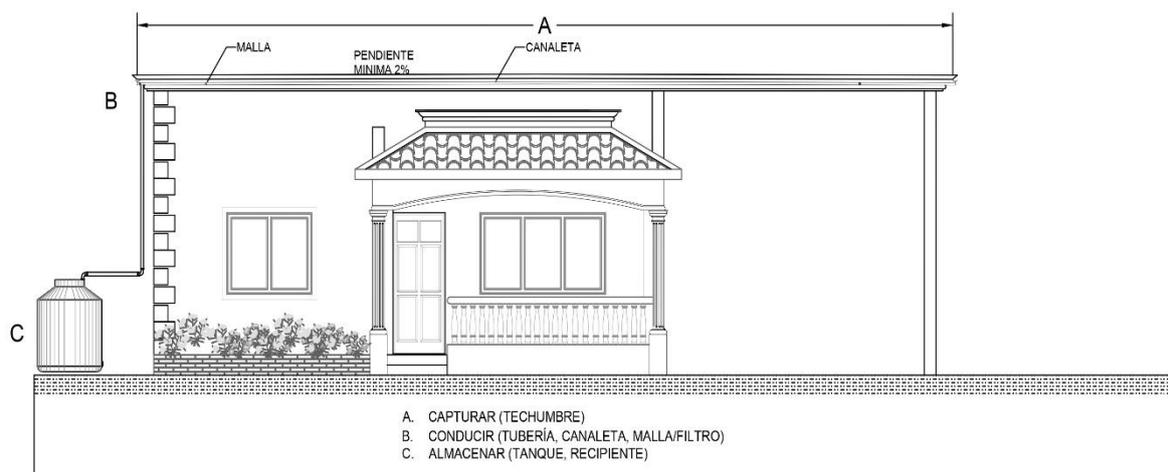


Figura 2.1 Esquema integral de un SCALL (CONAGUA, 2025)

Adaptaciones necesarias en la vivienda

- Estructura del techo: Debe ser impermeable y con pendiente adecuada para maximizar la captación (García-Ávila et al., 2023).
- Espacio para tanques: Requiere área suficiente cerca de la vivienda, ya sea subterránea o superficial (Musz-Pomorska et al., 2024).
- Sistema de tuberías: Adaptación de bajantes existentes o instalación de nuevas conducciones (Shadmehri Toosi et al., 2020).

Requisitos mínimos para su instalación

- Precipitación adecuada: Zonas con al menos 500 mm anuales son viables (Wang et al., 2024).
- Área de captación: Techos de 50 m² o más optimizan la recolección (Istchuk y Ghisi, 2023).
- Inversión inicial: Los costos varían según materiales y capacidad de almacenamiento (Dumit Gómez y Teixeira, 2017).
- Normativas locales: Algunas regiones exigen permisos o estándares de calidad para el agua almacenada (Ranaee et al., 2021).

Limitaciones y barreras

- Clima árido o irregular: Baja precipitación reduce la eficiencia (Soto-Montes-de-Oca y Alfie-Cohen, 2019).
- Contaminación del agua: Materiales del techo o deposición atmosférica pueden afectar la calidad (Leveque et al., 2024).

- Costos iniciales: La compra de tanques y sistemas de tratamiento puede ser prohibitiva para familias de bajos ingresos (Puppala et al., 2023).
- Falta de concienciación: Resistencia cultural o desconocimiento sobre mantenimiento (Sheikh, 2020; Khanal et al., 2023).

2.5.2 Principales usos del agua de lluvia cosechada

La cosecha de agua de lluvia se ha posicionado como una solución sostenible para mitigar la escasez hídrica, especialmente en zonas urbanas con infraestructura deficiente o suministro intermitente (tandeo). Los estudios analizados destacan sus múltiples usos en viviendas, así como los desafíos y recomendaciones para su implementación. A continuación, se presentan los más comunes identificados a través de los distintos trabajos consultados. Los autores coinciden en que el agua de lluvia puede destinarse a usos potables y no potables, dependiendo del tratamiento previo y las normativas locales.

Usos no potables

- Descarga de inodoros: Estudios en Polonia (Słyś y Stec, 2020) y Brasil (Dumit Gómez y Teixeira, 2017) muestran que este uso puede reducir el consumo de agua potable en un 50-80%.
- Riego de jardines: En Brisbane, Australia, se logró cubrir el 90% de la demanda para riego (Sapkota et al., 2014).
- Limpieza de pisos y lavado de ropa: En India y Bangladesh, estos usos representan hasta el 80% del consumo no potable (Khanal et al., 2023).

Usos potables (con tratamiento adicional)

Consumo humano: Requiere filtración, desinfección (ej. cloración o UV) y cumplir con estándares de calidad (Alim et al., 2020). En zonas rurales de Brasil y México, se ha implementado con éxito (García-Ávila et al., 2023).

Por otra parte, además de tomar en cuenta la viabilidad del tipo de consumo para el cual es posible utilizar el agua de lluvia cosechada, deben considerarse aspectos que pueden alentar su instalación, así como aquellas restricciones que nos permiten determinar donde no es posible su implementación. En la siguiente Tabla 2.2 se sintetizan los factores que pueden favorecer o limitar su implementación.

Tabla 4.2 Aspectos que favorecen o limitan la implementación de un SCALL

Factores favorecedores	Barreras
- Bajo costo comparado con infraestructura centralizada (Van Dijk et al., 2020).	- Inversión inicial alta (Musz-Pomorska et al., 2024).
- Autonomía hídrica en zonas con tandeo (Castelán-Cabañas et al., 2024).	- Falta de políticas públicas e incentivos (Khanal et al., 2023).
- Reducción de presión sobre acuíferos (Shadmehri Toosi et al., 2020).	- Calidad del agua variable (contaminación por techos o aire) (Alim et al., 2020).
- Adaptabilidad a climas diversos (Park y Um, 2018).	- Mantenimiento requerido (limpieza de tanques y canaletas) (Campisano et al., 2017).

2.5.3 Implementación exitosa de la cosecha de agua de lluvia en el mundo

La cosecha de agua de lluvia se ha consolidado como una solución eficaz para combatir la escasez hídrica en diversas regiones del mundo, especialmente en zonas urbanas con infraestructura deficiente o suministro irregular. Países como México, Brasil, India, Australia y Polonia han demostrado que, con sistemas bien diseñados y políticas de apoyo, esta práctica puede garantizar un abastecimiento sostenible de agua para usos domésticos, agrícolas e incluso potables.

En México, proyectos como Isla Urbana en la Ciudad de México han logrado que miles de familias almacenen agua durante la temporada de lluvias, reduciendo su dependencia del tandeo. En India, la cosecha de lluvia ha sido clave para mitigar la sobreexplotación de acuíferos, mientras que, en Australia, su implementación masiva en ciudades como Brisbane ha permitido cubrir hasta el 90% de la demanda no potable en hogares. Estos casos no solo destacan la viabilidad técnica de estos sistemas, sino también su impacto en la resiliencia hídrica de comunidades vulnerables.

A continuación, se exploran las regiones que han adoptado con éxito esta estrategia, los usos prioritarios del agua cosechada y las lecciones aprendidas que podrían replicarse en otros contextos con desafíos similares.

América

México: Proyectos en Ciudad de México (Isla Urbana) cubren hasta 8 meses de autonomía (Castelán-Cabañas et al., 2024).

Brasil: En Belém, se logró un ahorro del 49% en agua potable (Dumit Gómez y Teixeira, 2017).

Asia

India: En Tamil Nadu, los tanques tradicionales abastecen el 18% del riego (Bitterman et al., 2016).

Bangladesh: Sistemas RWH cubren el 50% del consumo doméstico (Khanal et al., 2023).

Europa

Polonia: Eficiencia del 80% en descarga de inodoros (Słyś y Stec, 2020).

Oceanía

Australia: En Brisbane, se suple el 90% de la demanda no potable (Sapkota et al., 2014).

2.5.4 Recomendaciones de tratamiento del agua

Para garantizar la calidad del agua de lluvia cosechada, los tratamientos varían según su uso final. En aplicaciones no potables como riego o limpieza, basta con una filtración básica mediante mallas o sedimentadores (Zabidi et al., 2020). Sin embargo, cuando el destino es el consumo humano, se requiere un proceso más riguroso: primero una filtración primaria con carbón activado o arena, seguida de una desinfección secundaria mediante cloración o luz ultravioleta (Alim et al., 2020). Además, es fundamental que estos sistemas cumplan con normativas internacionales como las de la OMS o estándares locales específicos (Ranaee et al., 2021). En cuanto a los usos para los cuales no se recomienda su utilización, se presenta un resumen en la Tabla 2.3.

Tabla 5.3 Tabla de usos recomendados y no recomendados

Uso	Recomendación	Autores de referencia
Descarga de inodoros	Altamente recomendado	Słyś y Stec (2020); Dumit Gómez y Teixeira (2017)
Riego de jardines	Recomendado	Sapkota et al. (2014); Park y Um (2018)
Lavado de ropa	Recomendado con filtro	Khanal et al. (2023)
Consumo humano	Solo con tratamiento	Alim et al. (2020); García-Ávila et al. (2023)
Uso en piscinas	No recomendado	

Como se aprecia en los datos anteriores, la cosecha de agua de lluvia es una estrategia viable para mejorar la seguridad hídrica en viviendas, especialmente en regiones con infraestructura deficiente. Su éxito depende de un diseño adecuado y mantenimiento continuo. Mientras los usos no potables son ampliamente aceptados, el consumo humano requiere inversión en tratamiento y monitoreo de calidad. Los casos de México, India y Australia demuestran su potencial global cuando se adapta a contextos locales.

2.5.5 Potencial del volumen cosechable para mitigar la escasez hídrica en viviendas

La cosecha de agua de lluvia se ha posicionado como una solución viable para enfrentar la escasez hídrica, especialmente en zonas urbanas con infraestructura deficiente. Diversos estudios coinciden en que el volumen aprovechable depende de factores como la precipitación local, el tamaño de la superficie de captación (generalmente azoteas) y la demanda doméstica. Por ejemplo, en regiones áridas como Irán, con precipitaciones anuales de alrededor de 200 mm, se ha demostrado que sistemas de almacenamiento entre 5,000 y 10,000 litros pueden cubrir una parte significativa del consumo doméstico (Shadmehri Toosi et al., 2020). En contraste, en zonas con mayor cantidad de lluvias, como la Ciudad de México (800 mm/año), una azotea de 100 m² puede captar hasta 80,000 litros anuales, suficientes para abastecer entre el 40% y 50% de las necesidades de una familia (Castelán-Cabañas et al., 2024). Sin embargo, la eficiencia de estos sistemas varía según la estacionalidad de las lluvias, ya que en periodos secos el suministro puede verse comprometido (Lin et al., 2019).

Relación entre superficie de azotea y capacidad de cosecha

La superficie de captación es un factor determinante en la viabilidad de los sistemas de cosecha de lluvia. Investigaciones como la de Gómez Núñez et al. (2022) proponen metodologías para dimensionar tanques de almacenamiento en función del área de techos disponibles. En un caso de estudio realizado en la UAM Azcapotzalco (México), donde la precipitación promedio es de 829 mm/año, se determinó que azoteas de 85 m², combinadas con tanques de 10 m³, podían garantizar autonomía hídrica durante el 58% del año. Por otro lado, en Australia, donde las lluvias son más abundantes (500–800 mm/año), techos de 100 m² logran captar hasta 100,000 litros anuales, cubriendo casi la totalidad de la demanda no potable (Alim et al., 2020). No obstante, la eficiencia de estos sistemas también depende del material de construcción de las azoteas, ya que superficies impermeables como el concreto tienen un mayor rendimiento que las de lámina, por ejemplo (García-Ávila et al., 2023). Además, los costos de implementación pueden ser una barrera, especialmente en sistemas centralizados, que requieren mayores inversiones en comparación con soluciones descentralizadas (Musz-Pomorska et al., 2024).

Precipitación mínima requerida para viabilidad del sistema

La cantidad de lluvia disponible es un factor crítico para determinar la factibilidad de la cosecha de agua pluvial. Estudios como el de Shadmehri Toosi et al. (2020) establecen que en regiones con precipitaciones superiores a 200 mm/año, estos sistemas pueden ser viables, aunque su eficiencia aumenta significativamente en zonas con más de 500 mm/año. Por ejemplo, en Houston (EE. UU.), donde la lluvia anual alcanza los 1,239 mm, la confiabilidad del sistema puede superar el 80%, mientras que, en áreas más secas, como Los Ángeles (378 mm/año), apenas alcanza el 35% (Park y Um, 2018). En casos

extremos, como Lanzhou (China), con solo 251 mm/año, los sistemas de cosecha apenas logran cubrir el 10% de la demanda en épocas de sequía (Wang et al., 2024). Para superar estas limitaciones, algunos autores proponen incentivos económicos, como subsidios, que permitan la implementación de estas tecnologías incluso en zonas con precipitaciones moderadas (Van Dijk et al., 2020). Un ejemplo exitoso se observa en Hermosillo (México), donde, a pesar de recibir precipitaciones apenas de 186–197 mm/año, la optimización del almacenamiento ha permitido cubrir hasta el 60% de la demanda doméstica (Soto-Montes-de-Oca y Alfie-Cohen, 2019).

Volúmenes cosechados por región

A continuación, se presenta un resumen de los volúmenes de agua cosechada en diferentes regiones del mundo, considerando su precipitación anual y capacidad de almacenamiento recomendada por los autores (Tabla 2.4):

Tabla 6.4 Capacidad de cosecha de agua de lluvia por región

Región	Precipitación (mm/año)	Volumen cosechado (litros/año)	% Demanda cubierta	Tamaño de tanque recomendado
Irán (Mashhad)	200	5,000–10,000	30–50%	5,000–10,000 L
Argelia (Beni-Mared)	605	2,700	33%	2,700 L
Australia (Brisbane)	1,318	100,000	90%	10,000–15,000 L
Houston (EE. UU.)	1,239	120,000	80–90%	10,000 L
Los Ángeles (EE. UU.)	378	30,000	35%	5,000 L
Ciudad de México	800	80,000	40–50%	10,000 L
Hermosillo (México)	186–197	15,000–20,000	60%	5,000–10,000 L

La cosecha de agua de lluvia es una estrategia sostenible para mitigar la escasez hídrica en viviendas, especialmente en zonas con infraestructura deficiente. De acuerdo con los datos de la tabla 2.4, los volúmenes de agua de lluvia adecuados oscilan entre 5,000 y 10,000 litros por hogar en regiones con precipitaciones superiores a 500 mm/año, mientras que en áreas más áridas se requieren ajustes técnicos. La superficie de azotea mínima recomendada es de 50–100 m², aunque la eficiencia depende del material de construcción y el diseño del sistema. Finalmente, aunque la tecnología es prometedora, su escalabilidad enfrenta desafíos como la variabilidad climática y los costos de implementación, lo que resalta la necesidad de enfoques adaptativos y financiamiento accesible para comunidades vulnerables.

2.6 Criterios técnicos del SCALL

2.6.1 Capacidad de la cosecha de agua de lluvia para mitigar la escasez

La capacidad del volumen de lluvia cosechado para mitigar la escasez de agua en viviendas se evalúa mediante parámetros como la relación entre el área de captación, la precipitación local y el consumo doméstico. Autores como Hernández et al. (2020) destacan que la ecuación básica para calcular el potencial de cosecha es (Ecuación 2.1):

$$V = A \times P \times C_e \quad (2.1)$$

Donde:

V = es el volumen captado (m^3 /año)

A el área de captación (m^2)

P la precipitación anual (m) y

Ce la eficiencia del sistema (generalmente entre 0.7–0.9 debido a pérdidas por evaporación o filtraciones).

Para dimensionar sistemas de cosecha de lluvia, se consideran:

- Demanda hídrica de la vivienda: Según Gould y Nissen-Petersen (1999), el consumo promedio en zonas rurales varía entre 50–100 L/persona/día.
- Disponibilidad pluvial: En regiones con >500 mm/año, la cosecha puede cubrir hasta el 50% del consumo no potable (riego, lavado) (Domènech, 2011).
- Balance hídrico: Comparar el volumen captado con la demanda anual (ej: una familia de 4 personas consume alrededor de 73 m^3 /año con una dotación de 50 L/persona/día).

2.6.2 Indicadores que miden la eficiencia de la cosecha de lluvia

Varios estudios han evaluado la capacidad de los sistemas de cosecha de lluvia para satisfacer las necesidades hídricas domésticas. Investigaciones como las de Shadmehri Toosi et al. (2020) y Zabidi et al. (2020) cuantifican qué proporción del consumo de agua puede abastecerse mediante esta técnica. Un caso destacado es Mashhad (Irán), donde el 72% del territorio analizado resultó apto para captación pluvial, alcanzando a suplir hasta la mitad del requerimiento hídrico en ciertas áreas. Resultados aún más significativos se observaron en Brisbane (Australia), donde una implementación a escala comunitaria demostró cubrir el 90% de la demanda para usos no potables (Zabidi et al., 2020). En México, Volpi-León et al. (2024) establecieron cuatro indicadores basados en parámetros hidrológicos, demográficos y urbanos. Estos indicadores permiten determinar el potencial del SCALL para aprovechar el agua recolectada para el autoconsumo de la población, el potencial de infiltración de la escorrentía, así como el

agua de escorrentía no aprovechada, con fines de establecer criterios para la selección de otras estrategias de resiliencia que mitiguen la escasez hídrica.

Para garantizar la efectividad de estos sistemas, se han desarrollado diferentes metodologías de evaluación. En cuanto a calidad del agua, Ranaee et al. (2021) aplicaron el Índice de Calidad del Agua (IRWQI), determinando que, con un tratamiento adecuado, el agua recolectada puede ser segura tanto para riego como para consumo doméstico. Desde una perspectiva económica, Istchuk y Ghisi (2023) analizaron la rentabilidad mediante indicadores financieros como el Valor Presente Neto (NPV) y la Tasa Interna de Retorno (IRR), concluyendo que los sistemas de distribución directa son más viables, particularmente cuando el agua se destina a usos como descargas sanitarias y riego.

En el ámbito de la gestión del riesgo hídrico, Lin et al. (2019) utilizaron el Índice de Agotamiento del Agua (WDI), demostrando que la cosecha pluvial puede reducir el estrés hídrico en hasta 159.3 m³ mensuales en ciudades como Taipéi. Por último, en términos de eficiencia operativa, Wang et al. (2024) crearon la herramienta StRaWHAT para medir la capacidad de control de escorrentía y la confiabilidad del suministro, evidenciando que, con tanques de 1 a 20 m³, es posible cubrir hasta el 90% de la demanda en condiciones ideales. Estos indicadores permiten optimizar el diseño e implementación de sistemas de cosecha de lluvia según las necesidades específicas de cada región.

Limitaciones identificadas en los SCALL

Los estudios actuales sobre sistemas de cosecha de lluvia presentan importantes omisiones que afectan su aplicación práctica. En el ámbito sociocultural, investigaciones como las de Khanal et al. (2023) revelan que la escasa sensibilización pública y la ausencia de marcos regulatorios adecuados -particularmente en contextos como Nepal- obstaculizan significativamente la implementación de estos sistemas. Complementariamente, Puppala et al. (2023) enfatizan cómo factores determinantes como la apropiación comunitaria y los estímulos económicos frecuentemente quedan fuera de los criterios de diseño técnico.

En cuanto a la sostenibilidad operativa, Campisano et al. (2017) alertan sobre la insuficiente investigación respecto a dos aspectos críticos: el deterioro progresivo de la calidad del agua almacenada y los requerimientos de mantenimiento de las instalaciones, elementos que comprometen la viabilidad a largo plazo de estas soluciones.

Su aplicación en contextos vulnerables representa otra limitación significativa. Gómez Núñez et al. (2022) y Castelán-Cabañas et al. (2024) destacan que la mayoría de las evaluaciones no consideran las particularidades de las viviendas de interés social, donde las limitaciones económicas y tecnológicas condicionan severamente la implementación. Finalmente, en materia de resiliencia climática, Bitterman et al. (2016) señalan que los modelos convencionales suelen pasar por alto fenómenos extremos como sequías persistentes o precipitaciones torrenciales, variables que inciden directamente en la

eficiencia de captación y almacenamiento. Estas omisiones subrayan la necesidad de enfoques más integrales que consideren tanto factores técnicos como contextuales.

2.6.3 Eficacia de la cosecha de lluvia para reducir el desabasto doméstico de agua

La cosecha de agua de lluvia es una solución viable para mitigar la escasez hídrica en zonas urbanas, especialmente en viviendas de interés social. Diversos estudios destacan su potencial para cubrir necesidades domésticas no potables, como la descarga de inodoros, riego de jardines, lavado de ropa y limpieza de áreas comunes. Por ejemplo, Słyś y Stec (2020) demostraron que, en Varsovia, Polonia, el uso de agua de lluvia para inodoros favoreció un ahorro del 80% en el consumo de agua potable, mientras que su uso combinado con riego redujo la eficiencia al 57%. Por otro lado, Campisano et al. (2017) señalan que los sistemas RWH pueden satisfacer hasta el 80-90% de la demanda doméstica no potable en regiones con alta precipitación, como Atlanta y Houston.

En cuanto a los volúmenes necesarios, los estudios varían según el clima y la demanda. Gómez Núñez et al. (2022) recomiendan tanques de 5 a 10 m³ para viviendas en la Ciudad de México, donde la precipitación anual es de 829 mm, logrando una autonomía hídrica de hasta 58% del año. En contraste, en zonas semiáridas como Urumqi, China, con solo 201.5 mm de lluvia anual, Xue et al. (2025) destacan que la viabilidad económica depende de tanques más pequeños (25-30 m³), aunque la cobertura es limitada. La siguiente tabla 2.5 resume ejemplos de cobertura y volúmenes recomendados por distintos autores:

Tabla 7.5. Capacidad y cobertura de agua pluvial para consumo doméstico

Ubicación	Precipitación (mm/año)	Usos domésticos	Volumen recomendado	Cobertura	Fuente
Varsovia, Polonia	581	Inodoros y riego	4-5 m ³ por vivienda	54-80%	Słysz y Stec (2020)
Ciudad de México	829	Limpieza y descargas	5-10 m ³	40-53%	Gómez Núñez et al. (2022)
Urumqi, China	201.5	Riego	25-30 m ³	Limitada	Xue et al. (2025)
Brisbane, Australia	1318	Uso doméstico no potable	50 m ³	90%	Zabidi et al. (2020)

Ventajas y desafíos de la cosecha de lluvia

La implementación de sistemas de cosecha de lluvia representa importantes beneficios económicos y operativos. Estudios como el de Dumit Gómez y Teixeira (2017) demuestran que pueden reducir entre 34% y 49% el gasto en agua potable, con periodos de recuperación de inversión inferiores a cinco años. Además, la investigación de Castelán-Cabañas et al. (2024) en Ciudad de México, demuestra que estos sistemas brindan autonomía hídrica parcial durante cinco a ocho meses. Sin embargo, este tipo de sistemas presentan limitaciones significativas: el agua recolectada necesita tratamiento para consumo humano (Alim et al., 2020), lo que eleva costos, y su eficiencia disminuye notablemente en zonas de bajas precipitaciones, donde la confiabilidad puede reducirse hasta 35% (Park y Um, 2018). La evidencia indica que, aunque la cosecha de lluvia es viable para usos no potables -con coberturas del 30% al 90% según condiciones locales-, su efectividad depende de diseños adaptados al contexto y estrategias que aborden sus limitaciones técnicas y económicas.

La literatura revisada en este capítulo confirma que los sistemas de cosecha de agua de lluvia (SCALL) constituyen una alternativa técnica viable para abordar la escasez hídrica en áreas urbanas con infraestructura limitada, particularmente en regiones de elevada precipitación y vulnerabilidad socioeconómica. Experiencias documentadas en ciudades como Ciudad de México, Brisbane y Varsovia demuestran que, mediante diseños adaptados y participación comunitaria, estos sistemas pueden satisfacer entre el 30% y el 90% de la demanda de agua no potable, disminuyendo la dependencia de fuentes tradicionales. No obstante, su efectividad está condicionada por variables como la estacionalidad de las lluvias, la capacidad de almacenamiento disponible y el respaldo de políticas públicas que incentiven su implementación.

A pesar de estos avances, la literatura presenta importantes vacíos: existen pocos estudios sobre la aplicación de SCALL en viviendas de interés social ubicadas en zonas semiáridas con altos índices de marginación, como Zacualtipán de Ángeles. Asimismo, hay una carencia de evidencia cuantitativa respecto a indicadores que evalúen de manera directa la reducción del acarreo de agua —una actividad con implicaciones físicas y económicas críticas para comunidades en situación de vulnerabilidad—, brecha que esta investigación pretende abordar mediante el desarrollo de indicadores específicos. Estas limitaciones destacan la necesidad de examinar, en el capítulo siguiente, la metodología diseñada para evaluar la factibilidad técnica y aceptación social de los SCALL en el contexto de estudio.

Capítulo 3: Metodología

3.1 Introducción

Este capítulo detalla el marco metodológico desarrollado para evaluar la efectividad de la cosecha de agua de lluvia en azoteas de viviendas, como estrategia en la gestión hídrica en la zona urbana de Zacualtipán de Ángeles. Para ello, se establecieron los parámetros necesarios para la evaluación: selección de la vivienda tipo (más representativa), datos de la población (como el número de usuarios, dotación necesaria, dotación recibida), otras fuentes de abastecimiento disponibles. También, se establecieron las condiciones hidrológicas para evaluar la viabilidad técnica de las propuestas. Para establecer las condiciones de suficiencia hídrica que existen en la zona, se implementaron los indicadores desarrollados por Volpi-León et al. (2024). Por último, se diseñó un indicador que permite medir la efectividad de estas estrategias con fines de mitigación de la escasez hídrica, reduciendo así la necesidad de acarreo de agua desde otras fuentes alternas.

3.2 Usos de suelo

En Zacualtipán de Ángeles, el área de estudio comprende una superficie total de 272.71 km². La distribución de usos de suelo se clasifica en cinco categorías principales: habitacional, agrícola, comercial, servicios y áreas naturales, basándose en datos del Marco Geoestadístico Municipal (INEGI, 2021) y estudios locales (Ramírez y Soto, 2019). Los porcentajes correspondientes a cada categoría son los siguientes (Figura 3.1):

- Áreas verdes: 65% (177.26 km²), destinadas a conservación ecológica y espacios públicos.
- Suelo desnudo: 20% (54.54 km²), principalmente terrenos no urbanizados en la periferia.
- Aceras y caminos: 12% (32.73 km²), correspondientes a infraestructura vial y peatonal.
- Techos (concreto): 3% (8.18 km²), distribuidos en zonas residenciales, comerciales y de servicios.

Estas categorías se interpretaron de la siguiente forma con base en los datos clasificados para este estudio:

- Uso habitacional: Representado por techos residenciales (3% del total), con 10,594 viviendas y una densidad de 3.6 habitantes por vivienda (INEGI, 2021). En este estudio se consideró que el 75.51% de estas viviendas es de interés social (8,000).
- Uso agrícola: Incluido en "suelo desnudo" (20%).

- Uso comercial y servicios: Agrupados en áreas no residenciales, con una población de 2,670 habitantes (7%) y 1,145 usuarios (3%), respectivamente.
- Áreas naturales: Corresponden a "áreas verdes" (65%), que incluyen bosques y zonas de conservación.

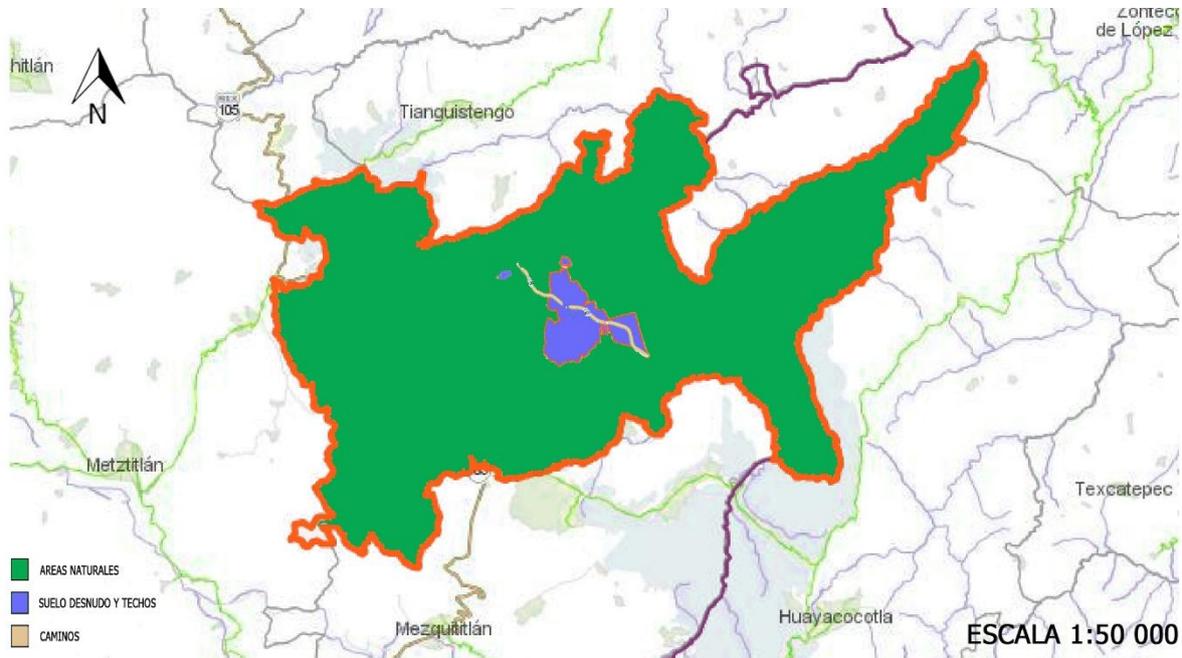


Figura 3.1 Distribución uso de suelo en el área de estudio

Esta distribución refleja una dinámica territorial donde el 35% del área total está destinada a actividades urbanas (techos, aceras y caminos), mientras que el 65% se preserva para funciones ambientales. La limitada proporción de suelo urbano contrasta con la alta densidad poblacional (139.9 habitantes/km²; INEGI, 2021), evidenciando presión hídrica y necesidad de optimizar recursos.

Su delimitación cuantitativa y espacial permite evaluar la viabilidad de implementar técnicas de bajo impacto (ej. cosecha de lluvia en techos residenciales o infraestructura verde en áreas naturales), tal como se propone en Volpi-León et al. (2024). Además, facilita identificar conflictos de uso (ej. expansión urbana sobre suelos agrícolas) y priorizar intervenciones para equilibrar sostenibilidad y desarrollo.

3.3 Coeficientes de absorción y escorrentía

Debido a la insuficiencia de la red pública para distribuir el agua a la población de manera eficiente, se plantea como otra problemática de Zacualtipán la ausencia de infraestructura hidráulica adecuada para interceptar y almacenar la lluvia con fines de abastecimiento; el sistema de alcantarillado y drenaje también es inadecuado, por lo que el agua de lluvia que no es interceptada para almacenamiento escurre sobre la zona urbana y se mezcla con la red de alcantarillado, contaminándose y afectando su disponibilidad para ser aprovechada.

Por lo anterior, en este estudio se aplican los indicadores desarrollados por Volpi-León et al. (2024) para establecer los volúmenes de agua que pueden ser aprovechados si se cosechan en las azoteas de viviendas con fines de autoconsumo, así como el volumen de escorrentía que puede ser infiltrado en espacios libres de la vivienda, como estrategia para recargar fuentes de agua subterráneas (Tabla 3.1). Esta información es recomendada para implementar políticas que favorezcan un uso adecuado del suelo y la gestión integral del agua, garantizando un entorno más resiliente frente a fenómenos climáticos extremos (INEGI, 2021; López, 2020).

Tabla 3.8 Coeficientes de absorción y escorrentía

Tipo de suelo	Coeficiente de absorción	Coeficiente de escorrentía
Suelo desnudo	0.57	0.43
Techos (concreto)	0.15	0.85

Adaptado de Volpi-León et al. (2024)

3.4 Características tipológicas de las viviendas

La planificación y el diseño de infraestructuras en Zacualtipán de Ángeles deben considerar diversos factores relacionados con el tipo de edificaciones presentes en el municipio, en especial aquellos que impactan el uso del espacio y el servicio de aguas pluviales, tales como las azoteas de viviendas. En este contexto, entender la distribución de los techos y las superficies que ocupan es fundamental para implementar un sistema de recolección de aguas superficiales (SCALL), ya que los diferentes tipos de techos tienen un comportamiento diverso en cuanto a la captación e infiltración de lluvia y escorrentía. Las viviendas de interés social, con una superficie total de 720,000 m² (Tabla 3.2), se consideran determinantes en este análisis para establecer la capacidad de almacenamiento y distribución a nivel de viviendas, con fines de mitigar la escasez hídrica doméstica (Ramírez y Soto, 2019; González, 2021). A continuación, se establecen los criterios paramétricos necesarios para el diseño y evaluación del SCALL (Tabla 3.2).

Tabla 9.2 Superficies disponibles para cosechar la lluvia

Vivienda tipo	Área total (m ²)	Número de unidades	Área promedio por lote (m ²)	Área promedio por azotea (m ²)
Vivienda interés social	720,000	8,000	90	61

La estimación del volumen de agua requerido y suministrado para consumo doméstico en Zacualtipán de Ángeles es importante para evaluar la eficiencia de los sistemas de abastecimiento y la necesidad de implementar mejoras en la distribución del recurso hídrico. El contraste entre el agua requerida y la suministrada revela un importante déficit en la cobertura del suministro (Tabla 3.3), especialmente en el sector habitacional,

donde solo se abastece el 33.3% de la demanda necesaria para satisfacer a la población (INEGI, 2021). Este análisis proporciona la base sobre la cual se podrán diseñar estrategias de gestión hídrica más eficaces, que optimicen los recursos y contribuyan a mitigar la brecha en la cobertura hídrica (Ramírez y Soto, 2019).

Tabla 10.3 Volumen de agua requerido y suministrado

Concepto	Volumen	Fuente
Población total (hab)	38,113	INEGI (2021)
Habitantes por vivienda	3.6	INEGI (2021)
Agua requerida (L/hab/día)	100	OMS (2025)
Agua suministrada (L/hab/día)	33.6	CONAGUA (2020)
Agua requerida total (L/día)	3,811,300	
Agua suministrada total (L/día)	1,280,597	
% Suministrado vs requerido	33.60%	

3.5 Selección de las precipitaciones de diseño

Para determinar el comportamiento de las precipitaciones a lo largo del año, se localizaron 2 estaciones climatológicas cercanas a la zona de estudio a través de la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN 2024). Las dos estaciones tienen las claves de CONAGUA 13042 (registro desde 1941 a 2022) y 13050 (registro desde 1961 a 1988). Para procesar la información, primero se aplicó el criterio de unificación de datos. En esta unificación, se combinaron los registros de ambas estaciones en una sola tabla, asegurando la coherencia de los datos. Enseguida, se reemplazaron valores nulos por cero (0) para evitar sesgos en el cálculo de promedios. Posteriormente, se realizó el cálculo del promedio mensual: se extrajeron los valores de precipitación de los meses de enero a diciembre. Se calculó el promedio de precipitación para cada mes utilizando la media aritmética de los valores reportados en las dos estaciones; también, se obtuvieron las precipitaciones máximas mensuales. Una vez hecha esta unificación, se representaron los resultados por medio de un gráfico de barras para mostrar la variabilidad de la precipitación mensual promedio y máxima durante el año representativo (se presenta en el siguiente capítulo como figura 4.1).

En una siguiente etapa, se realizó otro análisis de la información climatológica para evaluar si la precipitación promedio anual presenta una tendencia creciente, decreciente o estacionaria en el tiempo. Esto permitirá hacer futuras recomendaciones sobre la viabilidad de cosechar la lluvia en azoteas en el tiempo, dimensionar tanques de almacenamiento y proponer medidas de conservación del agua. Para evaluar la tendencia de la precipitación, primero se hizo una depuración de datos en Excel:

- 1) Se identificaron valores no numéricos en la columna año, los cuales fueron eliminados para garantizar la correcta aplicación de los modelos estadísticos. Se convirtió la columna año a formato numérico. Se eliminaron registros con valores de precipitación anual promedio ausentes.
- 2) Se hizo un análisis de regresión lineal. Para ello, se tomó el año como variable independiente (X) y la precipitación promedio anual como variable dependiente (Y). Se utilizó el modelo de Regresión Lineal para ajustar una ecuación de tendencia de la forma (Ecuación 3.1):

$$Y=mX + b \quad (\text{Ec. 3.1})$$

donde:

Y es la precipitación promedio anual,

X es el año,

m es la pendiente de la tendencia,

b es la intersección con el eje Y.

El modelo fue ajustado, obteniendo la predicción de valores para cada año en la serie de datos (Figura 4.2).

- 3) Para la visualización de resultados se generó un gráfico de dispersión para visualizar la precipitación promedio anual registrada durante cada año. Se trazó la línea de tendencia obtenida mediante la regresión lineal para identificar patrones de variabilidad en la precipitación a lo largo del tiempo.

3.6 Volumen de agua de lluvia cosechable en azoteas

Debido a que se observó variabilidad en las precipitaciones, se determinaron los percentiles de las precipitaciones con una probabilidad de 75% (Bigurra-Alzati et al., 2020). Los resultados de las precipitaciones con percentil 75 (Pp75) y las precipitaciones máximas en el mes (Pp_{máx}) se seleccionaron para establecer la capacidad de cosechar la lluvia en las azoteas de las viviendas tipo bajo dos escenarios (año más lluvioso y año con 75% de probabilidad de ocurrencia). Para ello, se utilizó la siguiente ecuación 3.2:

$$V_{all} = \frac{Pp \times A \times Ce}{1000} \times 0.765 \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde:

V_{all}: Volumen de lluvia cosechable (L)

Pp: Precipitación mensual (mm)

A: Área de azotea (m²)

Ce: Coeficiente de escurrimiento en azotea (0.85, concreto)

La ecuación tiene un factor de ajuste de 0.765 (Volpi-León et al., 2024), correspondiente a 15% de pérdidas por absorción/evaporación y 8.5% del volumen correspondiente a la separación de primeras lluvias (para mejorar la calidad del agua almacenada para autoconsumo).

3.7 Adaptación de indicadores base

La evaluación del balance entre la demanda y el suministro de agua en los diferentes usos de suelo en Zacualtipán de Ángeles evidencia brechas significativas en el servicio, sobre todo en el ámbito residencial. Para evaluar los parámetros hidrológicos y demográficos en la zona de estudio, se adaptó la metodología propuesta por Volpi-León et al. (2024), incluyendo la definición de coeficientes de absorción, escorrentía y requerimientos hídricos. Los datos fueron ajustados a las condiciones específicas de Zacualtipán de Ángeles, manteniendo la estructura original de los indicadores propuestos en el trabajo referido.

Los autores desarrollaron cuatro indicadores para evaluar estrategias de cosecha de lluvia en zonas urbanas semiáridas, integrando aspectos urbanos, demográficos e hidrológicos (Volpi-León et al., 2024):

a) Agua infiltrada (AI)

Mide la proporción de agua absorbida por el suelo (aw) (áreas verdes y suelo desnudo) respecto al total de lluvia recibida (rcw) (Ec. 3.3).

$$AI = \frac{\sum_{i=1}^n aw_i}{rcw} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

b) Agua disponible para consumo (ADC)

Es la relación resultante entre la suma del agua captada en azoteas (rwi) y el agua recibida (rcw) de la lluvia anual. El valor oscila entre 0 y 1, donde un valor cercano a 1 indica una mayor disponibilidad de agua captada en azoteas (Ec. 3.4).

$$ADC = \frac{\sum_{i=1}^n rwi}{rcw} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

c) Agua de escorrentía (AE)

Es la relación entre la suma del agua no utilizada (uwi) y el agua recibida (rcw) por la precipitación anual. El valor varía entre 0 y 1, siendo mejor cuanto más se acerque a 0, ya que esto indica que se desperdicia menos agua por escorrentía (Ec. 3.5).

$$AE = \frac{\sum_{i=1}^n uwi}{rcw} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

d) Agua suficiente (AS)

Es la relación resultante entre el agua disponible (vw) –que incluye el suministro real según los usos de suelo más el agua captada en azoteas– y la suma del agua requerida (nwi). El valor varía entre 0 y 1, donde un valor cercano a 1 indica que el agua disponible es casi igual a la cantidad necesaria (Ec. 3.6).

$$AS = \frac{vw}{\sum_{i=1}^k nwi} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

3.8 Diseño de indicadores para medir la viabilidad técnica del SCALL

Para evaluar la viabilidad de aprovechar la lluvia para autoconsumo, en este trabajo se diseñaron dos indicadores que establecen criterios para determinar si los volúmenes de agua de lluvia aprovechables pueden compensar el acarreo de agua. Este acarreo ocurre actualmente debido a los cortes en el abastecimiento que sufre la población (reciben solamente el 33.6% de la dotación necesaria). Para compensar este tandeo, los usuarios deben transportar el agua desde algunos pozos localizados en distintos puntos de Zacualtipán de Ángeles. Según lo que se investigó en la zona, los habitantes transportan en su mayoría cubetas de 19 L de capacidad, a pie o con ayuda de diablitos o carretillas. La distancia máxima que recorren es de 1 km y, cuando transportan un mayor volumen, utilizan otros medios de transporte. Se desconoce cuántos recorridos realizan en promedio al día, no obstante, se asume que al menos cubren el equivalente a la dotación recibida a través de la red municipal.

Para diseñar el primer indicador, se consideraron radios de acceso alrededor de los pozos. Estos radios de acceso establecen equidistancias a cada kilómetro alrededor con respecto a la población cercana (Figura 3.2). Esta suposición asume que, dentro de un radio máximo (1 km), la población circundante satisface parcialmente (el equivalente al 33.6%), mediante el acarreo hasta sus viviendas, la dotación no cubierta por el organismo regulador a través de la red de agua potable.

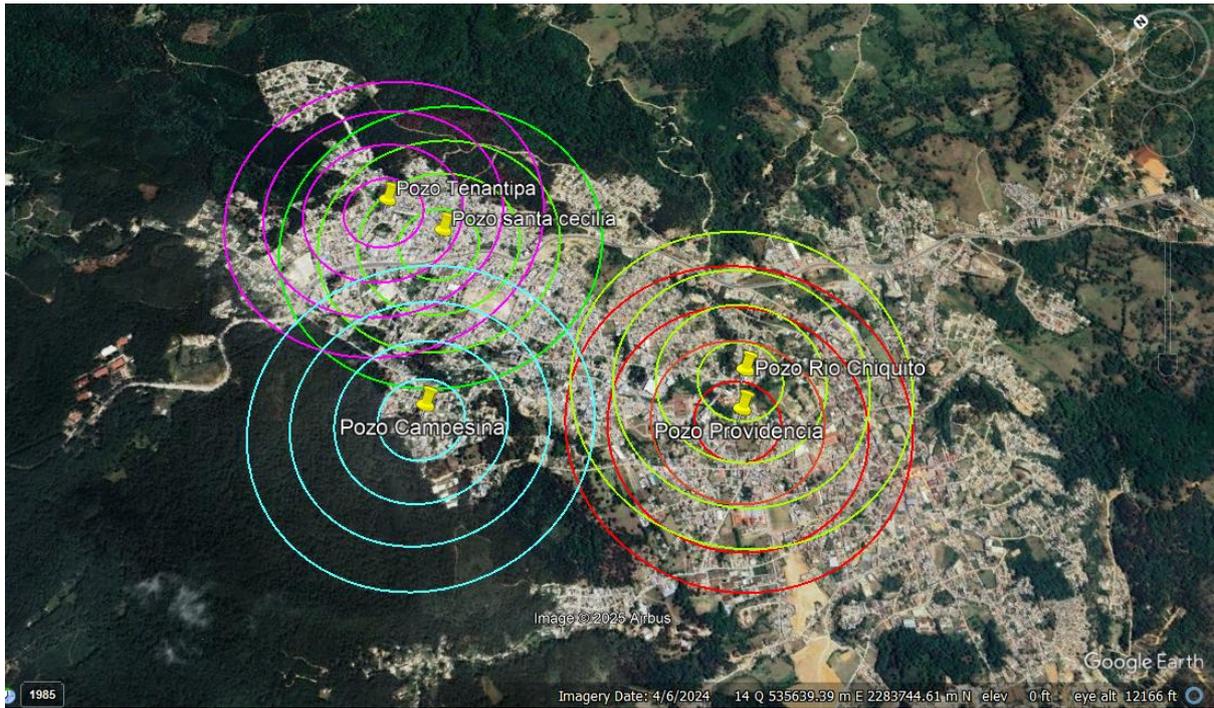


Figura 3.2 Distribución geográfica de pozos y radios de acceso a pozos de agua en Zacualtipán de Ángeles.

En la siguiente Tabla 3.4 se incluyen los datos de localización de los pozos disponibles desde donde se abastece la población, como estrategia para compensar el desabasto.

Tabla 11.4 Descripción general de los pozos de abastecimiento

Pozo	Coordenadas UTM	Uso
Tenantipa	14 Q 535321 2284997	Particular
Santa Cecilia	14 Q 535400 2284740	Público
Providencia	14 Q 535753 2283422	Público
Río Chiquito	14 Q 535872 2283525	Público
Campesina	14 Q 534891 2284204	Público

El mapa evidencia las distancias que los habitantes deben recorrer para suplir el déficit hídrico (radios equidistantes a cada km). El objetivo del primer indicador consiste en cuantificar por distancia desde las viviendas hasta el pozo de agua más cercano, la viabilidad de la cosecha de lluvia como estrategia para reducir el acarreo de agua. Enseguida, se establece que el volumen de agua de acarreo equivale al volumen actualmente suministrado en sus viviendas (33.6%) durante los 12 meses del año. A continuación, se detalla cómo se evaluaron los parámetros seleccionados para aplicar este indicador:

- a) Índice de viabilidad temporal (IVT)

Por medio de este indicador, se quiere evaluar la viabilidad de compensar el acarreo de agua por medio de la cosecha de lluvia en las azoteas de viviendas (a lo largo del año). Para ello, se utiliza la siguiente ecuación (Ecuación 3.7):

$$IVT = \frac{Vall}{Dac} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

Donde:

Vall: Es el volumen mensual de agua de lluvia cosechado (m^3)

Dac: Demanda anual compensada por medio del acarreo. En este trabajo, se considera que esta demanda anual equivale a la dotación recibida en la vivienda (33.6% de la dotación necesaria, en m^3)

Si:

$IVT \geq 1$, entonces el Vall compensa la necesidad de acarrear agua para mitigar la escasez hídrica en la vivienda.

$0 \leq IVT \leq 1$, el Vall compensa solamente un porcentaje del acarreo de agua.

b) Índice de viabilidad por distancia (IVD)

En caso de que el indicador anterior (IVT) determine que el SCALL en las viviendas es viable para compensar el volumen de agua proveniente del acarreo de agua de manera parcial o total, se propone un segundo indicador. El IVD determina hasta qué distancia (a partir de los primeros 100 m desde la vivienda) el volumen de agua cosechada en azoteas puede reemplazar el acarreo, considerando: el volumen de agua cosechada (dependiente de la precipitación y el área de captación), es decir, el IVT, así como la distancia de acarreo (Ecuación 3.8).

$$IVD = IVT \times Fd \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Donde:

d: Es la distancia máxima de transporte que hace viable la compensación del acarreo de agua por medio del agua de lluvia cosechada (1 km).

Fd: Este factor depende de la distancia que recorren los habitantes para transportar el agua desde sus viviendas hasta el pozo más cercano y de regreso a sus viviendas (1,000 m máximo), Ecuación 3.9:

$$Fd = 1 + \frac{d}{1000} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Si:

$IVD \geq IVT$, no es viable compensar el acarreo de agua por medio de la lluvia cosechada en las azoteas de las viviendas.

IVD es menor que IVT, es viable compensar el acarreo de agua por medio de la lluvia cosechada en las azoteas de las viviendas.

En este capítulo, la metodología propuesta combina indicadores adaptados (AI, ADC, AE, AS) y de nueva formulación (IVT, IVD) para evaluar de manera cuantitativa y cualitativa la factibilidad técnica y aceptación social de los SCALL en Zacualtipán de Ángeles. Mediante la selección de una vivienda tipo, el análisis hidrológico respaldado en registros históricos de precipitación y la evaluación de radios de acceso a fuentes subterráneas (pozos), se logra estimar no solo la capacidad de captación pluvial, sino también su efecto en la disminución del acarreo de agua. Estos indicadores, planteados para entornos con nivel socioeconómico restringido y estrés hídrico, establecen un marco analítico que sustenta la interpretación de los resultados presentados en el siguiente capítulo y su potencial contribución a la mitigación de la problemática hídrica regional.

Capítulo 4: Resultados y discusión

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados más sobresalientes respecto a la viabilidad de cosechar la lluvia en Zacualtipán de Ángeles con fines de autoconsumo doméstico, como estrategia para mitigar la escasez hídrica que sufre la población. Para ello, se analizó la distribución de las precipitaciones mensuales; después, se seleccionaron las precipitaciones con 75% de probabilidad de ocurrencia debido a su variabilidad a través del registro histórico seleccionado, así como la precipitación máxima. Posteriormente, se determinaron los volúmenes de lluvia cosechables mensualmente en el año y se contrastaron respecto al consumo doméstico necesario y el volumen abastecido por las autoridades locales. Por último, a través de indicadores base, se determinó la viabilidad de interceptar la lluvia para reducir la escasez hídrica de la población a escala de viviendas, estableciendo los volúmenes de lluvia aprovechables, los no aprovechados debido a que se mezclan con la red de drenaje local, así como los volúmenes infiltrados como opción para la recarga del acuífero local. Se establecieron dos nuevos indicadores, que permiten establecer la viabilidad de estas estrategias respecto a las condiciones actuales de la población referentes al desabasto, ya que deben transportar de manera particular el agua faltante desde pozos localizados en distintas partes de la ciudad.

4.2 Distribución de la lluvia en Zacualtipán de Ángeles

Como se explicó en el capítulo anterior, se promediaron las precipitaciones históricas correspondientes a las dos estaciones climatológicas más cercanas a la localidad (claves CONAGUA 13042 y 13050). En la figura 4.1 se presentan las precipitaciones promedio y máximas mensuales.

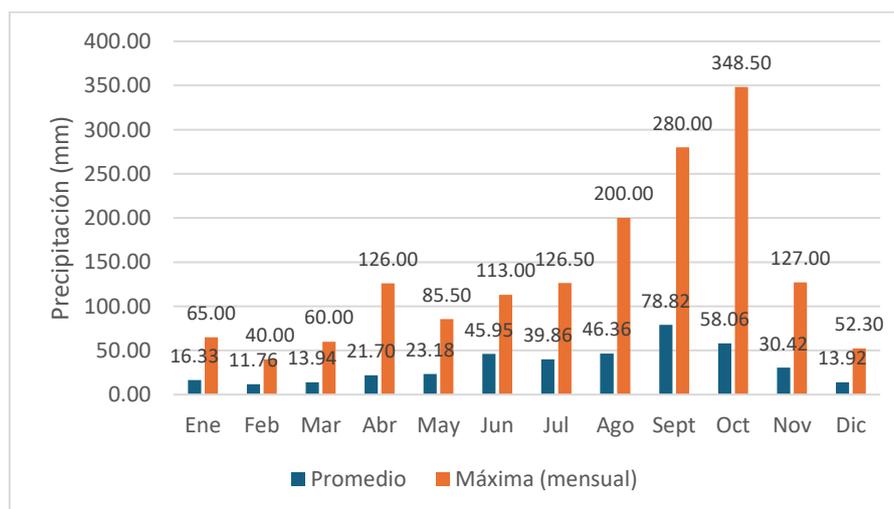


Figura 4.1 Distribución mensual de las precipitaciones

La precipitación promedio mensual en el año para ambas estaciones meteorológicas es de 33.36 mm y la máxima es de 135.32 mm, con una desviación estándar de 20.90 mm y

95.52 mm, respectivamente, lo que indica una alta variabilidad entre los meses húmedos y secos. El mes con mayor precipitación promedio es septiembre, con 78.82 mm, mientras que la máxima ocurre en octubre con 348.50 mm; esta diferencia sugiere que estos meses representan la temporada de lluvias más intensas en la región. El mes con menor precipitación es febrero, con un promedio de 11.76 mm y máxima de 40 mm, lo que confirma la presencia de una temporada seca bien definida. Estos resultados son consistentes con los patrones climáticos de muchas regiones, donde las lluvias suelen concentrarse en periodos específicos del año.

En cuanto a la tendencia que presentan las precipitaciones a través del tiempo, la pendiente obtenida en la regresión lineal es 0.0013 mm/año, lo que muestra una ligera tendencia creciente en la precipitación promedio anual a lo largo de más de ocho décadas (Figura 4.2).

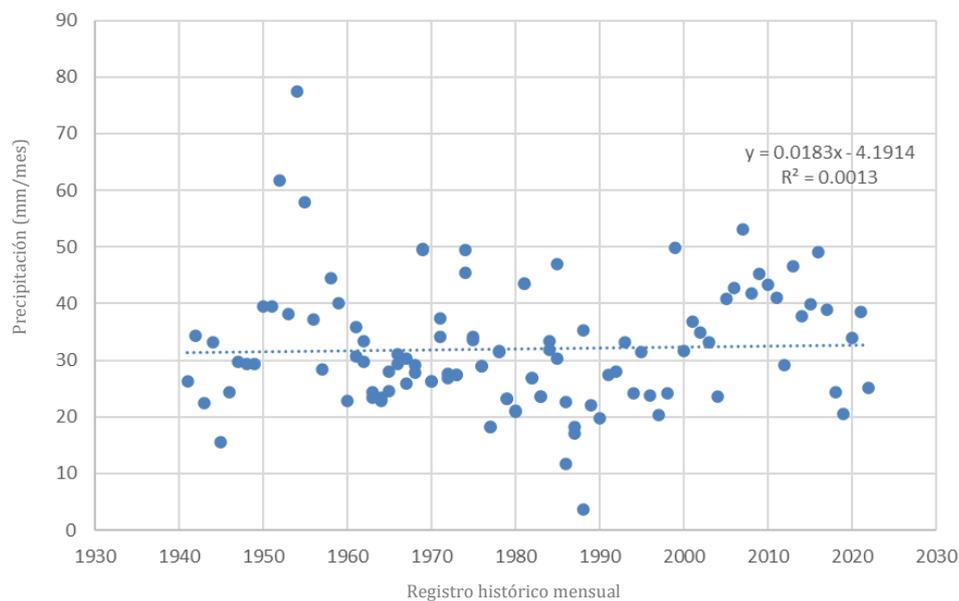


Figura 4.2 Tendencia de las precipitaciones históricas (mm) en Zacualtipán de Ángeles

A pesar de la variabilidad interanual, se observa que, en términos generales, la cantidad de precipitación ha mostrado un aumento marginal en el periodo analizado. Debido a esta variabilidad, algunos autores recomiendan tomar en cuenta precipitaciones con un rango de probabilidad de ocurrencia al menos de 50% (Bigurra-Alzati et al., 2020). En este trabajo, se propuso una probabilidad de ocurrencia de 75%, así que las precipitaciones (P_{p75}) y máxima (P_{pmax}) mensuales consideradas en este estudio fueron las siguientes (Figura 4.3).

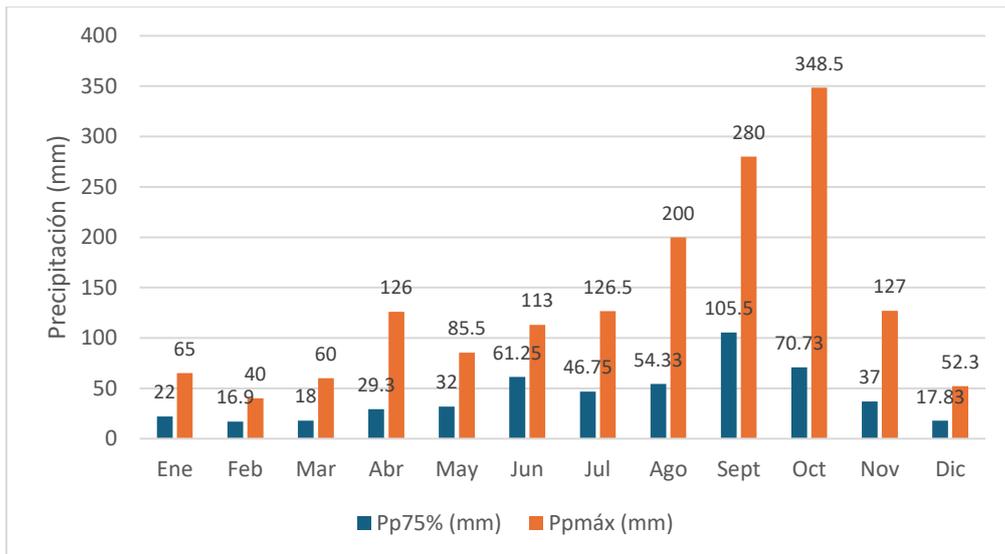


Figura 4.3 Precipitaciones mensuales máximas y con 75% de probabilidad de ocurrencia durante el año

De esta figura, se observa que la precipitación promedio anual con 75% de ocurrencia es de 42.63 mm, mientras que la máxima promedio anual es de 135.32 mm. Los meses más lluviosos son septiembre (Pp75%, 105.5 mm) y octubre (Ppmax, 348.50 mm), mientras que el mes más seco es febrero (Pp75%, 16.90 mm y Ppmax, 40.00 mm). Esta diferencia sugiere que la gestión del agua debe considerar estrategias de almacenamiento y regulación para compensar los periodos de baja disponibilidad hídrica.

4.3 Volumen cosechable para autoconsumo doméstico

A partir de los datos de precipitación mensual presentados en la Figura 4.3, se determinó el potencial de agua de lluvia cosechable para mitigar la escasez hídrica de la población a nivel de viviendas. A continuación, se presentan los resultados representativos de ambos escenarios analizados (Pp75% y Ppmax) y su capacidad para satisfacer la demanda a nivel doméstico (Figura 4.4).

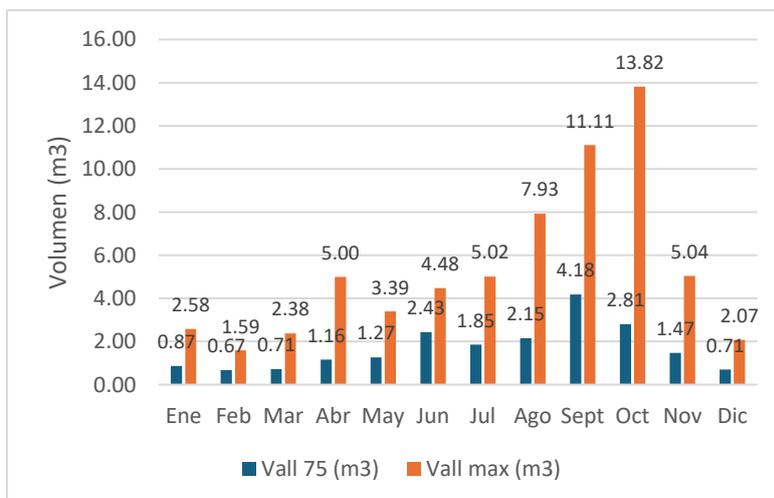


Figura 4.4 Volúmenes de agua de lluvia cosechable en azoteas de viviendas

Como es de esperarse, bajo el escenario de precipitaciones máximas (Vall max), los volúmenes cosechables en las

azoteas de viviendas son superiores al escenario con 75% de probabilidad de ocurrencia (Vall 75%). Los volúmenes de agua de lluvia aprovechables (Vap) mensualmente, en contraste con el volumen suministrado por el organismo local (solamente el 33.6% de la dotación necesaria), se muestran en la figura 4.5.

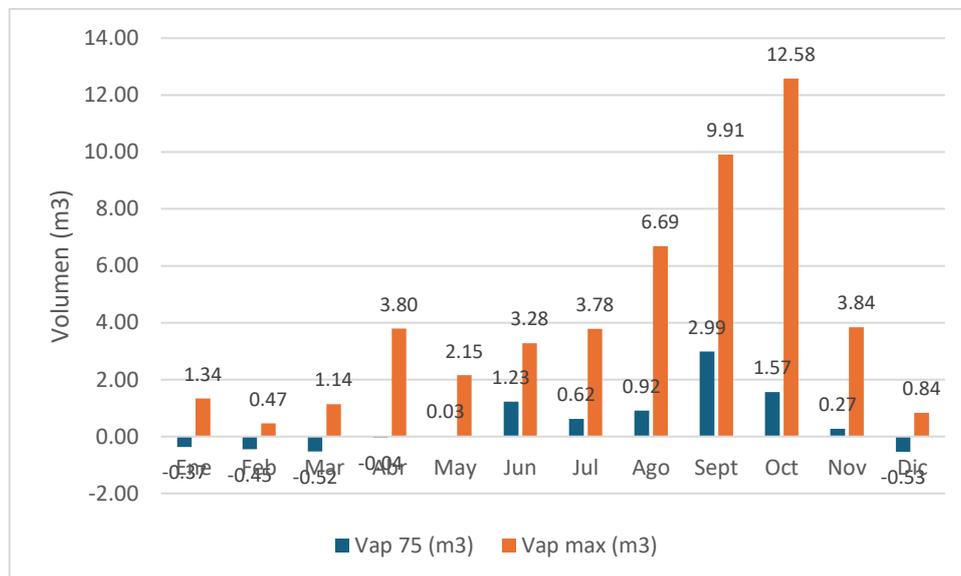


Figura 4.5 Volúmenes de agua de lluvia aprovechables para cubrir la dotación recibida en la vivienda (3.32 m³ al mes, en promedio). Los valores negativos indican que el volumen es inferior al mínimo necesario

Si se considera que, el volumen mensual recibido en la vivienda bajo condiciones de tandeo equivale a 3.32 m³, puede deducirse lo siguiente:

a) Para el escenario con Pp75, los volúmenes de agua de lluvia cosechada que pueden cubrir parcialmente (al menos el 50%) del volumen recibido por parte de la red de agua potable se concentran en los meses de septiembre y octubre (90.06% y 47.28%). Esta cobertura es equivalente al mismo volumen de agua que los usuarios deben acarrear desde los pozos más cercanos a la vivienda.

b) Para el escenario con Ppmax, los volúmenes de agua de lluvia cosechada cubren parcialmente (al menos el 50%) del volumen recibido desde abril hasta noviembre (64.75-378.9%). Los volúmenes superiores al 100% de la dotación necesaria (abril, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre) pueden considerarse como volúmenes de almacenamiento que pueden compensar los meses cercanos con menores precipitaciones, siempre y cuando los usuarios cuenten con tanques que les permitan su almacenamiento.

4.4 Indicadores base para evaluar la pertinencia del SCALL

La evaluación del balance entre la demanda y el suministro de agua en los diferentes usos de suelo en Zacualtipán de Ángeles evidencia brechas significativas en el servicio, sobre todo en el ámbito residencial. Para evaluar los parámetros hidrológicos (precipitación,

volúmenes de lluvia disponibles para su cosecha) y demográficos (tipo de vivienda, número de habitantes, superficies de azotea disponibles, dotación recibida) en la zona de estudio, se adaptó la metodología propuesta por (Volpi-León et al., 2024), incluyendo la definición de coeficientes de absorción, escorrentía y requerimientos hídricos. Los datos fueron ajustados a las condiciones específicas de Zacualtipán de Ángeles, manteniendo la estructura original de los indicadores propuestos en el trabajo referido.

El suelo desnudo presente en espacios abiertos de la vivienda contribuye con el 64.37% del agua absorbida en la zona, gracias a su mayor coeficiente de absorción (0.57), mientras que el techo de concreto, aunque impermeable, retiene parcialmente el agua. Esto refleja la importancia de preservar áreas permeables para la recarga de acuíferos (Tabla 4.1).

Tabla 12.1 Cálculo del agua absorbida

Tipo de superficie	(m ³)
Techo	10.98
Suelo desnudo	19.84
Total	30.82

Adaptado de Volpi-León et al. (2024)

El 85% del agua de lluvia que cae sobre el techo durante el año (62.22m³) puede captarse para uso doméstico. Esto equivale a 62,220 litros anuales, cantidad suficiente para cubrir el 47.35% de la demanda residencial (Tabla 4.2).

Tabla 13.2 Cálculo del agua de lluvia cosechada en techos

Tipo de superficie	(m ³)
Vivienda	62.22
Total	62.22

Adaptado de Volpi-León et al. (2024)

El 71% del volumen del agua de lluvia anual que no es cosechada (77.70 m³) se pierde como escorrentía debido a la alta impermeabilidad del techo (85%) y la moderada escorrentía del suelo desnudo (43%) (Tabla 4.3). Esto subraya la necesidad de implementar técnicas de retención.

Tabla 14.3 Cálculo del agua no utilizada

Tipo de superficie	(m ³)
Techo	62.22
Suelo desnudo	15.48
Total	77.70

El suministro actual cubre solo el 33.6% de la demanda doméstica. Esto evidencia una brecha crítica de 125.65 m³/año respecto a la dotación necesaria (100 L/hab/d), la cual podría mitigarse con la captación de agua pluvial (62.22 m³), reduciendo la dependencia de fuentes externas (Tabla 4.4).

Tabla 15.4 Cálculo de agua necesaria y suministrada

Tipo de consumo	Agua necesaria (L/hab/d)	Agua realmente suministrada (L/hab/d)
Doméstico	100.0	33.6

La Tabla 4.5 sintetiza el impacto de implementar sistemas SCALL en el municipio mediante cinco indicadores clave. Estos indicadores evidencian que el SCALL no solo optimiza el uso del agua lluvia (AWC y SW), sino que también reduce la presión sobre los recursos locales (IW y DS). Sin embargo, el alto valor del agua de escorrentía (ROW) subraya la necesidad de integrar soluciones de infraestructura verde para maximizar la sostenibilidad hídrica.

Tabla 16.5 Aplicación de los indicadores base en la zona de estudio

Indicador	Valor (adimensional)
Agua Infiltrada (IW)	0.29
Agua Disponible (AWC)	0.57
Agua de Escorrentía (ROW)	0.71
Agua Suficiente (SW)	0.7

Los resultados presentados en la tabla anterior indican que el 29% del agua de lluvia se infiltra al subsuelo, favoreciendo la recarga de acuíferos, mientras que el 57% de las precipitaciones puede aprovecharse mediante captación en techos para uso doméstico. Sin embargo, se registra una alta escorrentía (71%) debido a la predominancia de superficies impermeables, lo que muestra la necesidad de incrementar áreas permeables en la zona. Por otro lado, el sistema propuesto (SCALL) demostró ser eficaz, ya que cubriría el 70% de la demanda residencial de agua que actualmente reciben los usuarios de manera intermitente, contribuyendo así a mitigar la escasez hídrica.

Aunque en este estudio no se consideró el análisis económico del SCALL como parte de los objetivos, sí debe destacarse que, entre las ventajas de su implementación como estrategia para mitigar la escasez hídrica, reducir los volúmenes de escorrentía urbana y resiliencia ante el desabasto actual, los usuarios deben considerar su costo de instalación y mantenimiento para su aceptación y adaptación. En el Anexo 1 se desglosan las partes

principales que componen a un sistema de captación de agua de lluvia básico, adaptable en viviendas tipo como las analizadas en este estudio. Se realizó un análisis exploratorio del costo promedio de los materiales y mano de obra en la región, con la intención de estimar un costo paramétrico (costo en pesos mexicanos con relación al número de salarios mínimos). Este valor puede ser un referente para los usuarios interesados en instalar un SCALL en la vivienda con fines de contrastar el costo actual por concepto de acarreo de agua. Dado que no formó parte de los objetivos de este trabajo, no se discute este concepto.

4.5 El potencial del SCALL como alternativa al acarreo de agua

La figura 4.6 presenta un mapa que analiza la distribución de pozos en Zacualtipán de Ángeles y su relación con los núcleos habitacionales mediante un radio de acceso de 1 km. Este análisis cartográfico cuantifica las distancias críticas que la población debe recorrer para abastecerse de agua, evidenciando el esfuerzo logístico asociado al acarreo. Simultáneamente, el indicador de viabilidad del SCALL para mitigar la necesidad de acarreo permite evaluar técnicamente la posibilidad de sustituir este volumen hídrico mediante SCALL, planteando una solución basada en la cosecha de agua de lluvia como alternativa sostenible al transporte realizado a pie, con diablitos o carretillas desde distancias máximas de 1,000 m que, en promedio, les representa al menos 15 minutos en trasladarse hasta el pozo y volver a la vivienda con cubetas de 19L.

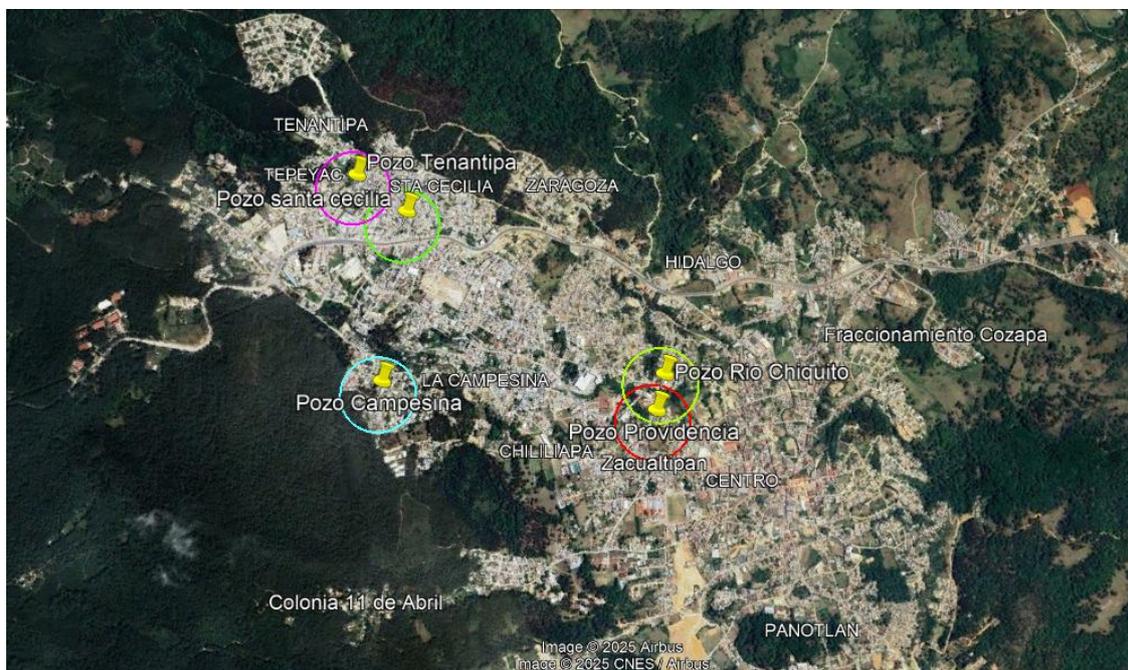


Figura 4.6 Distribución geográfica de pozos y radios de acceso a agua en Zacualtipán de Ángeles.

Debido a que existe una variabilidad temporal en cuanto a los volúmenes de agua de lluvia que son suficientes para compensar la dotación recibida por medio del tandeo (esta

equivale a la cantidad de agua que es acarreada desde los pozos disponibles en la zona), el índice de variabilidad temporal (IVT) demostró lo siguiente (Tabla 4.6):

Tabla 17.6 Índice de Variabilidad Temporal (IVT)

Mes	IVT (Pp75)	IVT (Ppmax)
Ene	0.26	0.76
Feb	0.22	0.52
Mar	0.21	0.70
Abr	0.36	1.53
May	0.38	1.00
Jun	0.74	1.37
Jul	0.55	1.48
Ago	0.64	2.35
Sept	1.28	3.39
Oct	0.83	4.09
Nov	0.45	1.54
Dic	0.21	0.61
Promedio	0.51	1.61

El análisis de los escenarios Pp75 y Ppmax (Tabla 4.6) muestra que la captación pluvial puede sustituir temporalmente hasta el 33.6% del volumen mensual requerido, reduciendo significativamente la necesidad de acarreo de agua. Según los criterios establecidos en este estudio, se considera viable la implementación del sistema cuando se alcanza al menos un 70% de compensación hídrica. Los resultados revelan que, en el escenario Pp75, el Índice de Viabilidad Temporal (IVT) cumple este umbral durante los meses de junio, septiembre y octubre, con una eficiencia promedio anual del 51%. En contraste, bajo condiciones Ppmax, el IVT supera el estándar (70%) entre enero y marzo-noviembre, logrando un 161% de eficacia anual, lo que evidencia su potencial como estrategia sostenible frente a la escasez.

Los resultados obtenidos demuestran que, durante ciertos periodos del año, persiste la necesidad de complementar el suministro hídrico doméstico mediante acarreo. Para analizar la factibilidad del SCALL en función de la proximidad a las fuentes de abastecimiento, se desarrolló un segundo indicador de evaluación: el Índice de Viabilidad por Distancia (IVD) (Tabla 4.7).

Tabla 18.7 Índice de Viabilidad por Distancia (IVD 75)

	d (m)	100	150	200
	IVT 75	IVD 75	IVD 75	IVD 75
Ene	0.26	0.28	0.30	0.31
Feb	0.22	0.24	0.25	0.26
Mar	0.21	0.23	0.24	0.25
Abr	0.36	0.39	0.41	0.43
May	0.38	0.41	0.43	0.45
Jun	0.74	0.82	0.85	0.89
Jul	0.55	0.60	0.63	0.66
Ago	0.64	0.70	0.73	0.76
Sept	1.28	1.41	1.47	1.53
Oct	0.83	0.91	0.95	1.00
Nov	0.45	0.49	0.52	0.54
Dic	0.21	0.23	0.24	0.25
Promedio	0.51	0.56	0.59	0.61

Como se observa en la Figura 4.6, los pozos disponibles se distribuyen en un rango de 1 km desde los núcleos residenciales en Zacualtipán de Ángeles. En este estudio, el IVD se calculó considerando la distancia máxima de acarreo de 1 km (Tabla 4.7), lo que permite cuantificar la eficiencia potencial del sistema en relación con la accesibilidad a las fuentes de agua más cercanas disponibles.

El análisis del IVD aplicó el mismo umbral del 70% para evaluar su viabilidad. Los datos de la Tabla 4.7 presentan que en el escenario Pp75, a distancias inferiores al km (100 m, 150 m, 200 m, etc.), el IVD supera al IVT, lo que significa que el SCALL es una estrategia que ayuda a compensar el esfuerzo que deben realizar las personas al acarrear el agua incluso a distancias muy cercanas (tiempo, esfuerzo relativo en el transporte de agua por medios manuales). Así como el IVT es viable principalmente durante los meses de lluvia (junio, agosto-octubre), de la misma forma, la relación $IVT \leq IVD$ se presenta durante el mismo periodo. Esto significa que adoptar estrategias de resiliencia como la cosecha de lluvia ayudan a compensar este esfuerzo de acarreo desde un 56% en promedio al año (para distancias mínimas) y, mientras esta distancia se acerque a 1, esta viabilidad aumentará. El estudio consideró innecesario evaluar distancias mayores a 1 km al preverse menor eficiencia (o viabilidad).

Como es de esperarse, para el segundo escenario (Pp max), estos valores aumentan, indicando una mayor viabilidad de instalación de SCALL como estrategias de compensación del esfuerzo por acarreo de agua (Tabla 4.8):

Tabla 19.8 Índice de Viabilidad por Distancia (IVD max)

d (m):	100	150	200
	IVT max	IVD max	IVD max
Ene	0.76	0.84	0.88
Feb	0.52	0.57	0.60
Mar	0.70	0.77	0.81
Abr	1.53	1.68	1.76
May	1.00	1.10	1.15
Jun	1.37	1.51	1.57
Jul	1.48	1.63	1.71
Ago	2.35	2.58	2.70
Sept	3.39	3.73	3.90
Oct	4.09	4.50	4.70
Nov	1.54	1.69	1.77
Dic	0.61	0.67	0.71
Promedio	1.61	1.77	1.85

Bajo las condiciones del segundo escenario analizado (precipitación máxima mensual, Pp max), se observa que la viabilidad del indicador (relación $IVT \leq IVD$) aumentó tanto en porcentaje, como en el número de meses. A la distancia mínima calculada de 100 m, se observa que esta relación se mantiene durante los meses de enero y marzo-noviembre; a partir de $d=150$ m, esta viabilidad incluye también el mes de diciembre.

4.6 Discusión

Los resultados presentados en este capítulo son consistentes con los hallazgos previamente establecidos en la literatura sobre la viabilidad de los sistemas de captación de agua de lluvia en contextos urbanos con infraestructura hidráulica deficiente. De manera similar con las experiencias reportadas por autores como Shadmehri Toosi et al. (2020) y Castelán-Cabañas et al. (2024), los resultados obtenidos en Zacualtipán de Ángeles demuestran que el aprovechamiento de la precipitación pluvial mediante el SCALL representa una estrategia técnica y socialmente viable para mitigar la escasez hídrica.

Uno de los hallazgos más relevantes es la alta eficiencia de captación potencial en viviendas de interés social. Según el análisis hidrológico realizado, la superficie de azotea promedio (61 m²) permitiría captar en promedio entre 1,690 y 5,370 litros de agua al mes durante los meses más lluviosos, cifra que coincide con los cálculos realizados por Zabidi et al. (2020) para techos de tamaño similar. Esta capacidad permitiría cubrir entre el 50.96% y el 161.76% de la dotación doméstica mensual recibida (equivalente al 33.6% de la dotación necesaria), consistente con lo reportado por Vardon et al. (2025), quienes documentan coberturas similares en viviendas urbanas de Australia.

La adaptabilidad del sistema al contexto de Zacualtipán de Ángeles —caracterizado por una precipitación máxima anual promedio de 1,623.8 mm— refuerza las observaciones de Castelán-Cabañas et al. (2024), quienes identificaron que regiones con más de 800 mm anuales tienen un alto potencial de cosecha de lluvia. Este dato es alentador si se considera que en la zona de estudio la precipitación excede los umbrales mínimos de viabilidad planteados en los manuales técnicos internacionales (JICA y PNUMA, 2000; IFOAM, 2004).

En términos de resiliencia hídrica, los resultados de esta tesis respaldan las afirmaciones de autores como Jamali et al. (2021) y Volpi-León et al. (2024) acerca de que los SCALL no sólo proporcionan acceso alternativo al agua, sino que además fortalecen la autonomía hídrica doméstica, disminuyendo la dependencia de redes públicas ineficientes. Se calculó que, en Zacualtipán de Ángeles, la cobertura potencial de los SCALL podría suplir entre el 15.44% y 49.01% de la demanda doméstica anual de agua (para los escenarios de Pp75 y Ppmax, respectivamente), lo que representa un avance sustantivo frente a las condiciones actuales, donde la red pública apenas cubre el 33.6% de la demanda necesaria (CONAGUA, 2020; INEGI, 2021).

Una contribución de esta investigación es el desarrollo de dos indicadores de viabilidad técnica y social específicamente orientados a medir la capacidad del SCALL para compensar el actual acarreo de agua que realiza la población para mitigar el desabasto. Este enfoque es relevante porque permite traducir el beneficio técnico de la captación de lluvia en una reducción tangible del esfuerzo físico que actualmente realizan las familias, quienes en muchos casos deben destinar hasta el 15% de sus ingresos en la compra o transporte de agua (Castelán-Cabañas et al., 2024). El hecho de que el SCALL pueda suplir, al menos parcialmente, el volumen de agua que de otro modo tendría que acarrear manualmente o comprarse, constituye un aliciente para su aceptación social. Tal como señalaron Khanal et al. (2023), la aceptación comunitaria de tecnologías hídricas sostenibles aumenta cuando estas directamente disminuyen cargas cotidianas y costos económicos para los hogares.

Desde la perspectiva normativa, los resultados son consistentes con los criterios técnicos establecidos en documentos nacionales (CONAGUA, 2025; SEDEMA, 2024), que recomiendan superficies de captación lisas, pendientes mínimas del 2%, y techos de concreto o lámina, condiciones que predominan en las viviendas estudiadas. Esta

consistencia con la normativa facilita la escalabilidad del enfoque propuesto y refuerza la posibilidad de integrarlo en programas de vivienda sostenible impulsados por organismos como CONAVI (2022).

Por otra parte, esta investigación destaca un beneficio ambiental adicional: la reducción de la escorrentía superficial no controlada. Aplicando los coeficientes de escorrentía reportados por Volpi-León et al. (2024), se identificó que captar agua en techos no sólo provee agua para consumo, sino que disminuye la generación de escorrentía que actualmente afecta la calidad de las fuentes de agua superficiales. Este doble efecto — provisión hídrica e impacto positivo en la gestión urbana de la escorrentía— refuerza la postura de Jamali et al. (2021) respecto al papel de los SCALL como elementos de infraestructura híbrida sostenible.

4.6.1 Posibles limitaciones de la investigación

Aunque los resultados obtenidos son alentadores, es importante reconocer ciertas limitaciones inherentes al enfoque y alcance de esta investigación, las cuales abren oportunidades para futuros estudios:

Datos secundarios

La evaluación hidrológica se basó en registros censales y climatológicos disponibles (INEGI, CONAGUA, SMN), por lo que la calidad y resolución de los datos dependieron de la precisión y actualización de estas fuentes. No se realizó una verificación de campo sobre el estado real de las azoteas, sistemas de drenaje pluvial existentes o patrones de uso del agua por vivienda.

Simulación teórica de escenarios

Los indicadores de viabilidad técnica se calcularon a partir de escenarios teóricos de captación y demanda, sin implementaciones piloto que permitieran medir empíricamente su comportamiento real bajo variabilidad interanual de lluvias, mantenimiento del sistema o fluctuaciones en el consumo doméstico.

Consideraciones socioculturales

Aunque se infiere una aceptación social del SCALL debido al esfuerzo actual del acarreo de agua, no se realizaron encuestas o entrevistas directas a la población para explorar barreras culturales, percepciones de calidad del agua de lluvia o disposición de los usuarios a mantener los sistemas instalados, aspectos que Puppala et al., 2023 identifican como críticos para la sostenibilidad de estas estrategias.

Variabilidad climática futura

Si bien la precipitación histórica sugiere viabilidad técnica, no se modelaron escenarios de cambio climático a largo plazo que pudieran alterar las disponibilidades futuras de lluvia en Zacualtipán de Ángeles, como lo han propuesto Wang et al. (2024) en contextos similares.

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

La investigación desarrollada demuestra que la implementación de sistemas de cosecha de agua de lluvia (SCALL) en viviendas de interés social en Zacualtipán de Ángeles es técnicamente viable y representa una estrategia efectiva para mitigar la escasez hídrica que aqueja a la región. Las condiciones climatológicas locales, caracterizadas por una precipitación máxima anual promedio de 1,623.8 mm, así como las características físicas de las viviendas tipo, ofrecen un potencial significativo para el aprovechamiento del recurso pluvial. El análisis realizado revela que, mediante el diseño adecuado de los sistemas de captación, sería posible cubrir hasta el 49.01% del abastecimiento doméstico de agua, disminuyendo de manera sustancial la dependencia de fuentes públicas de abastecimiento. La investigación también destaca la pertinencia de los indicadores diseñados para medir la eficiencia de captación y su impacto en la disminución del acarreo de agua, aportando una herramienta replicable para contextos similares. Sin embargo, se identificaron algunas limitaciones, como la estacionalidad de las lluvias, la necesidad de mantenimiento técnico de los sistemas, los posibles costos de instalación y los desafíos socioculturales asociados a la aceptación de nuevas tecnologías. En conjunto, estos hallazgos subrayan la importancia de fomentar estrategias integrales que vinculen aspectos técnicos, económicos y sociales para garantizar la sostenibilidad y efectividad de las soluciones propuestas.

5.2 Recomendaciones

Considerando los resultados obtenidos y las limitaciones identificadas, se recomienda impulsar programas gubernamentales de subsidio o financiamiento que faciliten la instalación de SCALL en viviendas de interés social, asegurando su accesibilidad económica para las familias más vulnerables. Paralelamente, se sugiere diseñar e implementar programas de capacitación comunitaria enfocados en el correcto mantenimiento y operación de los SCALL, de manera que se maximice su vida útil y su eficiencia operativa. Es indispensable que las autoridades locales promuevan la incorporación obligatoria de sistemas de captación pluvial en nuevas edificaciones, tomando como referencia las experiencias normativas exitosas en otras entidades del país, como la Ciudad de México. Asimismo, se recomienda complementar la captación de agua de lluvia con estrategias de infraestructura verde que favorezcan la recarga de acuíferos, aprovechando las áreas urbanas disponibles para incrementar la resiliencia hídrica de la zona. Además, los usuarios deben establecer mecanismos de tratamiento y monitoreo periódico de la calidad del agua recolectada, especialmente cuando su uso esté destinado a actividades sensibles como limpieza de alimentos o higiene personal. Finalmente, se propone replicar la metodología desarrollada en esta investigación en otros municipios con condiciones socioeconómicas y climáticas similares, lo que

permitiría fortalecer la gestión integral del agua a escala regional y contribuir a la construcción de comunidades urbanas más resilientes y sostenibles.

5.3 Futuras líneas de investigación

Derivado de los hallazgos obtenidos, se considera pertinente que futuras investigaciones profundicen en el análisis de viabilidad económica de los sistemas de cosecha de agua de lluvia en viviendas de interés social, incorporando evaluaciones de costo-beneficio que contemplen variables como el periodo de recuperación de inversión y el ahorro económico a largo plazo. Asimismo, sería valioso desarrollar estudios experimentales que implementen proyectos piloto en comunidades vulnerables, a fin de validar empíricamente los indicadores de eficiencia diseñados y evaluar la aceptación social de estas tecnologías en contextos reales. Otra línea de investigación relevante consiste en integrar escenarios de cambio climático, particularmente en lo que respecta a la variabilidad y disminución de precipitaciones, para anticipar la resiliencia futura de los sistemas de captación. Adicionalmente, se propone explorar la combinación de SCALL con otras estrategias de soluciones basadas en la naturaleza, evaluando su sinergia en términos de recarga de acuíferos y control de escorrentía.

Referencias bibliográficas

Alim, M. A., Rahman, A., Tao, Z., Samali, B., Khan, M. M., y Shirin, S. (2020). Suitability of roof harvested rainwater for potential potable water production: A scoping review. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119226. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119226>

Belmeziti, A. (2024). Assessing rainwater harvesting scenarios to mitigate potable water storage needs in Algerian individual houses under intermittent supply. *Journal of Environmental Management*, 370, 122466. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122466>

Bigurra-Alzati, C. A., Ortiz-Gómez, R., Vázquez-Rodríguez, G. A., López-León, L. D., y Lizárraga-Mendiola, L. (2020). Water Conservation and Green Infrastructure Adaptations to Reduce Water Scarcity for Residential Areas with Semi-Arid Climate: Mineral de la Reforma, Mexico. *Water*, 13(1), 45. <https://doi.org/10.3390/w13010045>

Bitterman, P., Tate, E., Van Meter, K. J., y Basu, N. B. (2016). Water security and rainwater harvesting: A conceptual framework and candidate indicators. *Applied Geography*, 76, 75-84. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.09.013>

Campisano, A., Butler, D., Ward, S., Burns, M. J., Friedler, E., DeBusk, K., Fisher-Jeffes, L. N., Ghisi, E., Rahman, A., Furumai, H., y Han, M. (2017). Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives. *Water Research*, 115, 195-209. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.056>

Castelán-Cabañas, R., Padilla-Rivera, A., Muñoz-Villarreal, C., y Güereca-Hernández, L. P. (2024). Advancing urban water autonomy: A Social Life Cycle Assessment of rainwater harvesting systems in Mexico City. *Cleaner Environmental Systems*, 13, 100193. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2024.100193>

García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen: para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana* (5ª edición, corregida y aumentada). México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía. ISBN: 970-32-1010-4

Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2020). Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Edición 2020. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/situacion-del-subsector-agua-potable-alcantarillado-y-saneamiento-2020>

Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2023). Continúa escasez de agua potable en Zacualtipán. Buzos.com.mx. <https://buzos.com.mx/noticiaVer/Contin%C3%BAa-escasez-de-agua-potable-en-Zacualtip%C3%A1n>

Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2025) LINEAMIENTOS TÉCNICOS: SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA a NIVEL VIVIENDA p. 20. gob.mx. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/976468/Lineamientos_t_cnicosSCALL_2025.pdf

CONAFOVI (2005). Guía para el uso eficiente del agua en desarrollos habitacionales. Primera edición, 68 pp. México, D.F. ISBN: 968-7729-33-3. Consultado desde: <https://www.conavi.gob.mx/images/documentos/normateca/Guia%20del%20Uso%20Eficiente%20del%20Agua%20en%20Desarrollos%20Habitacionales.pdf>

CONEVAL. (2020). Medición de la pobreza. Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. <https://www.coneval.org.mx>

Congreso de la Ciudad de México (2020). Ley del Derecho al Acceso, Disposición y Saneamiento del Agua de la Ciudad de México. Congreso de la Ciudad de México, I Legislatura. Última reforma publicada en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México el 29 de octubre de 2020. Consultado desde: <https://www.congresocdmx.gob.mx/media/documentos/20af644dec17c38142fd2e7da44ddba4eb8b0dca.pdf>

Domènech, L. (2011). Rethinking water management: From centralized to decentralized water supply and sanitation systems. Documents d'Anàlisi Geogràfica 2011, vol. 57/2 293-310.

Dumit Gómez, Y., y Teixeira, L. G. (2017). Residential rainwater harvesting: Effects of incentive policies and water consumption over economic feasibility. Resources, Conservation and Recycling, 127, 56-67. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.015>

Eakin, H., Bojórquez-Tapia, L. A., Janssen, M. A., Georgescu, M., Manuel-Navarrete, D., Vivoni, E. R., ... & Lerner, A. M. (2016). Urban resilience efforts must consider social and political forces. Proceedings of the National Academy of Sciences, 113(2), 186-189. <https://doi.org/10.1073/pnas.1620081113>

FAO (2000). Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia. Experiencias en América Latina. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 235 pp. Santiago, Chile. Consultado desde: <https://www.fao.org/4/ai128s/ai128s00.pdf>

JICA y PNUMA (2000). Guía práctica para cosechar el agua de lluvia. Proyecto de Desarrollo Rural Integral Sostenible en la Provincia de Chimborazo, 24 pp. República de Ecuador. Consultado desde: https://www.jica.go.jp/Resource/project/ecuador/001/materials/ku57pq000011cym2-att/water_harvest_sp.pdf

García-Ávila, F., Guanoquiza-Suárez, M., Guzmán-Galarza, J., Cabello-Torres, R., y Valdiviezo-Gonzales, L. (2023). Rainwater harvesting and storage systems for domestic supply: An overview of research for water scarcity management in rural areas. *Results in Engineering*, 18, 101153. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101153>

Gómez Núñez, J., García Martínez, M., Mompremier, R., González Beltrán, B. A., y Barceló Quintal, I. D. (2022). Methodology to Optimize Rainwater Tank-sizing and Cluster Configuration for a Group of Buildings. *Water Resources Management*, 36(13), 5191-5205. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03299-7>

González, J. A. (2021). Análisis de la infraestructura hídrica en zonas semiáridas: El caso de Zacualtipán de Ángeles. *Revista Mexicana de Ingeniería Hidráulica*, 12(3), 45-60.

Gould, J., & Nissen-Petersen, E. (1999). Rainwater catchment systems for domestic supply: Design, construction and implementation. Intermediate Technology Publications. Consultado desde: <https://practicalactionpublishing.com/book/1761/rainwater-catchment-systems-for-domestic-supply>

Hernández, L., Martínez, R., & García, P. (2020). Metodologías para la evaluación de sistemas de captación pluvial en contextos urbanos. *Ingeniería Hidráulica en México*, 35(4), 112-125.

IFOAM (2004). Manual de capacitación en agricultura orgánica para los trópicos áridos y semiáridos. International Federation of Organic Agriculture Movements, 288 pp. Alemania. Consultado desde: <https://www.fibl.org/fileadmin/documents/shop/1043-manual-tropicos-aridos-semiaridos.pdf>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2021). Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social 2021. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/611371/Informe_anual_2021_mun_13081.pdf

Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores [INFONAVIT]. (2023). Reporte Anual 2023: Vivienda Social y Sustentabilidad. <https://www.infonavit.org.mx/transparencia/documentos-institucionales>

Istchuk, R. N., y Ghisi, E. (2023). Influence of Design Variables on the Financial Feasibility of Rainwater Harvesting Systems. *Water*, 15(6), 1112. <https://doi.org/10.3390/w15061112>

Jamali, F. S., Khaledi, S., y Razavian, M. T. (2021). Priority Areas for Developing Green Infrastructure in Semi-arid Cities: A Case Study of Tehran. *Environment and Urbanization ASIA*, 12(1), 118-135. <https://doi.org/10.1177/0975425321990326>

Khanal, G., Maraseni, T., Thapa, A., Devkota, N., Paudel, U. R., y Khanal, C. K. (2023). Managing water scarcity via rainwater harvesting system in Kathmandu Valley, Nepal: People's awareness, implementation challenges and way forward. *Environmental Development*, 46, 100850. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100850>

Latif, S., Alim, M. A., y Rahman, A. (2022). Disinfection methods for domestic rainwater harvesting systems: A scoping review. *Journal of Water Process Engineering*, 46, 102542. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102542>

Leveque, B., Irakiza Shyaka, A., Ndong, M., Jalbert, J., Burnet, J.-B., Kammoun, R., Dorner, S., y Bichai, F. (2024). Assessing the vulnerability of urban drinking water intakes to water scarcity under global change: A bottom-up approach. *Environmental Challenges*, 15, 100885. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100885>

Lin, C.-C., Liou, K.-Y., Lee, M., y Chiueh, P.-T. (2019). Impacts of urban water consumption under climate change: An adaptation measure of rainwater harvesting system. *Journal of Hydrology*, 572, 160-168. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.032>

López, J. (2020). Gestión hídrica en zonas semiáridas: El caso de Zacualtipán de Ángeles. *Revista Mexicana de Ingeniería Hidráulica*, 45(2), 112-125. <https://doi.org/10.28950/rmih.2020.12345>

Medina-Rivas, R., Pérez-Castro, R., & Torres-Lima, P. (2022). Calidad del agua en manantiales de Zacualtipán: Impacto de la contaminación agrícola. *Ingeniería Hidráulica en México*, 37(3), 45-60. <https://doi.org/10.29057/ihm.v37i3.7890>

Musz-Pomorska, A., Widomski, M. K., y Gołębiowska, J. (2024). Financial Aspects of Sustainable Rainwater Management in Small-Scale Urban Housing Communities. *Sustainability*, 16(2), 780. <https://doi.org/10.3390/su16020780>

NOM-001-CONAGUA-2011. (2011). Norma Oficial Mexicana: Requisitos para la captación y aprovechamiento del agua pluvial. *Diario Oficial de la Federación*.

NOM-244-SSA1-2020. (2020). Norma Oficial Mexicana: Criterios sanitarios para el manejo del agua de lluvia. *Diario Oficial de la Federación*.

Noori, R., & Singh, S. K. (2023). Urban sprawl and groundwater depletion: A case study of semi-arid regions in developing countries. *Journal of Hydrology*, 615(Part B), 128765. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.128765>

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2025). Directrices para el uso seguro de agua de lluvia en entornos domésticos [Informe técnico en prensa]

Ortiz, S., De Barros Barreto, P., y Castier, M. (2022). Rainwater harvesting for domestic applications: The case of Asunción, Paraguay. *Results in Engineering*, 16, 100638. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100638>

Park, D., y Um, M.-J. (2018). Sustainability Index Evaluation of the Rainwater Harvesting System in Six US Urban Cities. *Sustainability*, 10(1), 280. <https://doi.org/10.3390/su10010280>

Puppala, H., Ahuja, J., Tamvada, J. P., y Peddinti, P. R. T. (2023). New technology adoption in rural areas of emerging economies: The case of rainwater harvesting systems in India. *Technological Forecasting and Social Change*, 196, 122832. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122832>

Ramírez, A., & Soto, M. (2019). Planificación urbana y gestión del agua en Hidalgo: Lecciones desde Zacualtipán. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Ranaee, E., Abbasi, A. A., Tabatabaee Yazdi, J., y Ziyabee, M. (2021). Feasibility of Rainwater Harvesting and Consumption in a Middle Eastern Semiarid Urban Area. *Water*, 13(15), 2130. <https://doi.org/10.3390/w13152130>

Sapkota, M., Arora, M., Malano, H., Moglia, M., Sharma, A., George, B., y Pamminer, F. (2014). An Overview of Hybrid Water Supply Systems in the Context of Urban Water Management: Challenges and Opportunities. *Water*, 7(1), 153-174. <https://doi.org/10.3390/w7010153>

Secretaría de Desarrollo Social [SEDESOL]. (2011). Diagnóstico de la calidad del agua en comunidades rurales de Hidalgo. <https://www.gob.mx/sedesol/documentos>

SEDEMA, 2024. Cosecha de lluvia. Programa Social de la Ciudad de México. Consultado desde: <https://cosechalluvia.sedema.cdmx.gob.mx/>

Semaan, M., Day, S. D., Garvin, M., Ramakrishnan, N., y Pearce, A. (2020). Optimal sizing of rainwater harvesting systems for domestic water usages: A systematic literature review. *Resources, Conservation and Recycling*: X, 6, 100033. <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2020.100033>

Severis, R. M., Silva, F. A. D., Wahrlich, J., Skoronski, E., y Simioni, F. J. (2019). Economic analysis and risk-based assessment of the financial losses of domestic rainwater harvesting systems. *Resources, Conservation and Recycling*, 146, 206-217. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.040>

Shadmehri Toosi, A., Ghasemi Tousi, E., Ghassemi, S. A., Cheshomi, A., y Alaghmand, S. (2020). A multi-criteria decision analysis approach towards efficient rainwater harvesting. *Journal of Hydrology*, 582, 124501. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124501>

Sheikh, V. (2020). Perception of domestic rainwater harvesting by Iranian citizens. *Sustainable Cities and Society*, 60, 102278. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102278>

Servicio Meteorológico Nacional [SMN]. (2021). Reporte Climatológico Anual 2021. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica>

Servicio Meteorológico Nacional [SMN]. (2024). Proyecciones climáticas para Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica>

Sociedad Hipotecaria Federal (2014). Programas de Vivienda Sustentable. Construcción de vivienda sustentable, ECOCASA, Vivienda adecuada para todos. Consultado desde: <https://www.gob.mx/shf/acciones-y-programas/programa-ecocasa-shf>

Soto-Montes-de-Oca, G., y Alfie-Cohen, M. (2019). Impact of climate change in Mexican peri-urban areas with risk of drought. *Journal of Arid Environments*, 162, 74-88. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.10.006>

Słyś, D., y Stec, A. (2020). Centralized or Decentralized Rainwater Harvesting Systems: A Case Study. *Resources*, 9(1), 5. <https://doi.org/10.3390/resources9010005>

Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia [UNICEF]. (2016). Acceso al agua y equidad de género en México: Un análisis desde la infancia. <https://www.unicef.org/mexico/informes>

Ursino, N. (2016). Risk Analysis Approach to Rainwater Harvesting Systems. *Water*, 8(8), 337. <https://doi.org/10.3390/w8080337>

Valdez, M., López, J., & Ramírez, T. (2016). Eficiencia hídrica en viviendas sociales: Casos de estudio en el centro de México. *Revista Internacional de Sustentabilidad*, 21(2), 78-94.

Van Dijk, S., Lounsbury, A. W., Hoekstra, A. Y., y Wang, R. (2020). Strategic design and finance of rainwater harvesting to cost-effectively meet large-scale urban water infrastructure needs. *Water Research*, 184, 116063. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116063>

Vardon, M. J., Le, T. H. L., Martinez-Lagunes, R., Pule, O. B., Schenau, S., May, S., y Grafton, R. Q. (2025). Accounting for water: A global review and indicators of best practice for improved water governance. *Ecological Economics*, 227, 108396. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108396>

Volpi-León, V., Seck-Tuoh-Mora, J. C., Bigurra-Alzati, C. A., Juárez-Sedano, A. D., y Lizárraga-Mendiola, L. (2024). Design of Urban Indicators to Optimize the Implementation of Low-Impact Techniques in Semi-Arid Cities. *Applied Sciences*, 15(1), 294. <https://doi.org/10.3390/app15010294>

Wang, J., Jia, J., Cao, S., Diao, Y., Wang, J., y Guo, Y. (2024). StRaWHAT: A stochastic rainwater harvesting assessment tool for direct quantification of rainwater harvesting system performance. *Journal of Cleaner Production*, 436, 140582. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140582>

Xue, C., Xiong, F., Li, J., Li, X., Li, J., Wang, Y., Li, X., y Cui, Z. (2025). Economic feasibility assessment and parameter sensitivity analysis of rainwater harvesting systems in different climatic zones of China. *Water-Energy Nexus*, 8, 6-17. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2025.01.001>

Zabidi, H. A., Goh, H. W., Chang, C. K., Chan, N. W., y Zakaria, N. A. (2020). A Review of Roof and Pond Rainwater Harvesting Systems for Water Security: The Design, Performance and Way Forward. *Water*, 12(11), 3163. <https://doi.org/10.3390/w12113163>

Anexo 1

A continuación, se presenta un desglose de los costos de los principales componentes de un SCALL doméstico en México, seleccionando opciones económicas de mercado. Todos los precios están en pesos mexicanos (MXN) al año 2025 y se tomaron de proveedores nacionales (Tabla a):

Tabla a. Desglose de costos de componentes del SCALL

Componente	Unidad	Costo unitario (MXN)	Fuente
Tubo PVC sanitario 3"	Metro	\$39.67	Home Depot
Codo PVC sanitario 90° 3"	Pieza	\$12.00	DepotMX
Tee PVC sanitario 3"	Pieza	\$21.00	DepotMX
Cople PVC sanitario 3"	Pieza	\$6.50	DepotMX
Válvula esfera PVC 3" (económica)	Pieza	\$391.00	Mercado Libre
Malla filtro para barril (Ø 100 cm)	Pieza	\$449.00	Bodega Aurrera
Tinaco Rotoplas 1100 L	Pieza	\$ 1999.00	Coppel
Canalón PVC tradicional 3.07 m	Pieza	\$265.00	Home Depot
Bajante PVC tradicional 3.06 m	Pieza	\$469.00	Home Depot

Se considera una instalación típica con (Tabla b):

- 10 m de tubería PVC
- 4 codos
- 2 Tees
- 2 Coples
- 1 válvula de bola (para derivación o primera descarga)
- 1 malla de filtro
- 1 tinaco de 1100 L
- 1 canalón de 3.07 m
- 1 bajante de 3.06 m

Tabla b. Presupuesto para un sistema básico de SCALL

Ítem	Cantidad	Subtotal (MXN)
Tubería PVC 3"	10 m	396.7
Codos 90° 3"	4	48
Tees 3"	2	42
Coples 3"	2	13
Válvula esfera 3"	1	391
Malla filtro barril	1	449
Tinaco 1100 L	1	1 999.00
Canalón 3.07 m	1	265
Bajante 3.06 m	1	469
Total, aproximado		4172.70

Estos costos pueden variar según la capacidad del tanque (5000–15000 L), tipo de material y trabajos adicionales (obra civil, refuerzos, permisos).

Para estimar el esfuerzo económico necesario en una vivienda tipo donde se desee instalar un SCALL, se tomó como criterio base el salario mínimo en México (año 2025).

- Zona del Salario Mínimo General (resto del país): \$278.80 MXN diarios
- Zona Libre de la Frontera Norte: \$419.88 MXN diarios

Considerando el salario mínimo general (\$278.80 MXN/día) en la Tabla c:

Tabla c. Comparativa del costo contra los días de salario mínimo.

Costo del sistema (MXN)	Días de salario mínimo equivalente
4172.70	≈ 15 días

La instalación del SCALL representa un esfuerzo equivalente a quince días de salario mínimo. Debe destacarse que este costo puede aumentar en función del tamaño del

tanque elegido, así como el costo por mantenimiento (es recomendable al menos una vez al año), por lo que se sugiere tomar decisiones informadas con base en un presupuesto adaptado al tipo de vivienda y usuario.