



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis de los sistemas de
captación de agua de lluvia en la
Zona Metropolitana de la Ciudad
de México bajo escenarios de
cambio climático**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Geomático

P R E S E N T A N

Luz Esmeralda Escudero Rivera

y

Miguel Preisser González

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Juan Manuel Núñez Hernández



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE CAPTACION DE AGUA DE LLUVIA EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMATICO que presenté para obtener el título de INGENIERO GEOMÁTICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

LUZ ESMERALDA ESCUDERO RIVERA
Número de cuenta: 420054164



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE CAPTACION DE AGUA DE LLUVIA EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MEXICO BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMATICO que presenté para obtener el título de INGENIERO GEOMÁTICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

MIGUEL PREISSER GONZALEZ
Número de cuenta: 420052421

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Le dedico esta tesis a todas aquellas personas y situaciones que, a lo largo de mi vida, creyeron en mis capacidades incluso cuando yo las desconocía. Quizás en algún momento sus expectativas se sintieron como un peso; sin embargo, me impulsaron a ser exigente conmigo misma y jamás rendirme. Hoy me llena de dicha y orgullo caminar con la seguridad de saber que soy capaz de cumplir cualquier meta que me proponga.

Gracias, mami, por siempre procurar mi educación y darme el apoyo para cumplir mi sueño de estudiar en la UNAM. Tu fortaleza ante la vida ha sido un gran ejemplo para mí. Gracias por tu continuo apoyo durante toda esta etapa, por consentirme y por creer en mí.

Gracias a mis hermanas Angélica y Sofía. A Angélica, por acompañarme en mi travesía como universitaria, foránea y ahora adulta joven. Gracias por ser mi adulta de confianza. A Sofi, por alegrarme con tu personalidad ocurrente y divertida. Las quiero mucho.

Gracias a los profesores y amigos que me guiaron e hicieron compañía en el camino. Al Mtro. Adolfo Reyes Pizano, por ser un gran profesor y hacerme disfrutar las clases con su humor y su excelente capacidad de transmitir conocimientos. A todos aquellos profesores que me inspiraron con su ejemplo y despertaron en mí una pasión por ciertos campos de la Geomática.

Al Dr. Juan Manuel Núñez, por fungir como asesor de este trabajo y por darme la oportunidad de realizarlo en conjunto con Miguel.

Por último, pero no menos importante, gracias a Miguel por ser mi compañero de tesis. Tener tu compañía en el proceso me dio la seguridad de saber que lo lograría. Apreciaré siempre tu esfuerzo y las palabras de aliento que me diste en el camino. We did it! Te quiero mucho.

- Luz Esmeralda Escudero Rivera

Durante toda esta etapa de mi vida tuve la fortuna de conocer a personas que me apoyaron, inspiraron y enseñaron el valor del esfuerzo y la paciencia. Cada una de ellas ha sido parte esencial de este camino, y a todas les agradezco profundamente.

Le dedico este logro a mi padre, quien me inculcó la disciplina, el amor por el estudio y la importancia de ayudar a los demás. Gracias por enseñarme a valorar la ingeniería, por tu ejemplo que perdurará en mi memoria y por siempre ver algo único en mí. Para ti madre, que tu esfuerzo y fortaleza me ayudaron a culminar mis estudios, por apoyarme sin siquiera dudarlo un segundo, tenerme paciencia para cumplir mi meta de estudiar en la UNAM y gracias a ti fue que conocí la ingeniería geomática.

Gracias a mi hermano Juan Carlos, por ser una fuente constante de admiración y por compartirme tus experiencias para entender la vida, las cuales me ayudan a encontrar inspiración y dirección en mi propio camino. A mis hermanos Arelí y Alejandro, por siempre preguntarme cómo me va en la escuela, y aunque sus caras me dicen que no le entienden a mi carrera siempre me dan apoyo incondicional. Extiendo mi gratitud a mi tía Socorro y a mi hermana Elena, quienes me acompañaron con cariño en este proceso y me brindaron su apoyo en todo momento. A mi tía Alejandra, mi tío Noé y a mis primos Gerardo y Noé, por su apoyo incondicional, su generosidad y por estar siempre dispuestos a ofrecer su ayuda cuando la necesité, se los agradezco mucho. Así mismo extiendo un agradecimiento a mi tía Vero, mi tío Alfonso, mi tía Guille y a mi tío José Luís, con quien siempre mantengo conversaciones sobre ingeniería y béisbol.

A mi mejor amigo en el mar por alegrar mi vida.

Valoro profundamente a mis profesores, quienes me transmitieron el gusto por la ingeniería y la docencia, por ser una fuente de admiración. A mis compañeros de la universidad por las pláticas y risas, quienes gracias a ellos pude disfrutar esta etapa y llevarme increíbles recuerdos. Le agradezco mucho al Dr. Juan Manuel Núñez, por su orientación, acompañamiento y enseñanzas durante todo el desarrollo de esta tesis. Su guía fue clave para culminar este escrito y permitirme colaborar con mi compañera de tesis Esme.

Finalmente, dedico un especial agradecimiento a mi compañera de tesis, Esme, con quien compartí este proyecto desde sus inicios y logramos culminarlo. Gracias por brindarme tu apoyo y entusiasmo, así como mostrarme el valor de la dedicación. Ha sido un privilegio recorrer esta etapa universitaria a tu lado. Te quiero mucho.

- Miguel Preisser González

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	5
Objetivo general	6
Objetivos particulares	7
1. LA PRECIPITACIÓN EN EL MARCO DEL CAMBIO CLIMÁTICO	8
1.1 Cambio climático y recursos hídricos	8
Modelos de Circulación General	9
Modelos Climáticos Regionales	11
Horizontes Temporales	12
Trayectorias de Concentración Representativa (RCPs)	14
Impacto del cambio climático en los patrones de precipitación	16
1.2. Escenarios climáticos del CMIP6	17
1.3. Uso de modelos climáticos en estudios hídricos	21
2. SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA	24
2.1 Historia y evolución de los SCALL	24
Historia	24
Evolución	26
Evolución en los métodos de instalación y materiales usados.	28
Métodos de instalación	28
Materiales usados	30
2.2 Implementación y beneficios en entornos urbanos	31
Condiciones y retos para la implementación urbana	33
Beneficios ambientales, sociales y económicos	34
Criterios técnicos y normativos para su implementación urbana	34
2.3 Marco normativo y políticas de captación de agua de lluvia	36
Marco legal en el ámbito nacional	36
Regulación y programas en la Ciudad de México	37
Retos pendientes	38
2.4 Factores que afectan la eficiencia de los SCALL	39
3. ÁREA DE ESTUDIO	42
3.1 Contexto de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)	42
Aspectos físicos y geográficos	43
Características climáticas	44

Contexto social y demográfico	46
3.2 Problemática hídrica y vulnerabilidad de la ZMCM	48
4. PROPUESTA METODOLÓGICA	54
4.1 Edificaciones en la ZMCM y su potencial de captación	54
4.2 Estimación del área de captación disponible	55
Ecuación de extrapolación lineal	56
Ajuste por eficiencia y estimación del área de captación disponible	58
4.3 Selección de escenarios climáticos	59
4.4 Análisis de los SCALL con base en disponibilidad de precipitación	60
4.5 Evaluación cualitativa de vulnerabilidad hídrica en la ZMCM	62
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
5.1 Línea base de captación de agua de lluvia al 2020	64
5.2 Proyecciones de precipitación futura en la ZMCM	65
5.3 Potencial de captación de agua de lluvia en edificaciones	67
5.4 Impacto del cambio climático en el análisis de los SCALL	70
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
6.1 Conclusiones principales	74
6.2 Recomendaciones para la integración de SCALL en políticas de adaptación	74
REFERENCIAS	77
GLOSARIO DE TÉRMINOS	88
ANEXOS	90

INTRODUCCIÓN

La Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) enfrenta una combinación crítica de crecimiento urbano, presión demográfica y variabilidad climática que impacta la seguridad hídrica de la región. En ese contexto, los Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) se plantean aquí como medida de adaptación y mitigación local, orientada a aliviar la presión en los meses de mayor estrés hídrico y a complementar el abastecimiento convencional. Este trabajo evalúa el potencial de captación a escala metropolitana bajo condiciones actuales y en un horizonte cercano (2040), incorporando explícitamente la expansión urbana, el crecimiento poblacional y los cambios en los patrones de precipitación como resultado del cambio climático.

El enfoque metodológico de la tesis se aborda con dos ejes. Primero, se construye una línea base 2020 que estima el volumen potencial de captación a partir de la huella de techumbres y la población observada al 2020, utilizando como referencia climática la precipitación media del periodo 1970–2000. Segundo, se desarrolla una proyección al 2040 que integra: el crecimiento de superficie edificada estimado mediante extrapolación de series recientes de huellas de edificios, la población esperada con base en proyecciones oficiales, y proyecciones climáticas CMIP6 (horizonte 2021–2040) para caracterizar posibles cambios en la precipitación. Con ello, se explora cómo varía la disponibilidad potencial por persona y las implicaciones para el dimensionamiento de almacenamiento y la priorización territorial de los SCALL.

Metodológicamente, la estimación del volumen captado se fundamenta en la relación directa entre precipitación y área efectiva de techumbre, ajustada por una eficiencia global representativa de condiciones urbanas (pérdidas por primer flujo, rugosidad, conducción y

operación). El resultado clave se expresa como litros por habitante por día ($L \cdot hab^{-1} \cdot día^{-1}$), métrica que facilita comparar territorios y dialogar con umbrales operativos de suficiencia para usos domésticos no potables. Bajo esta lógica, la tesis no propone los SCALL como solución estructural al desabasto, sino como un instrumento práctico para transitar los periodos secos, reducir demanda de red en sitios factibles y orientar decisiones de diseño con base en evidencia espacial y escenarios climáticos contrastantes.

Los aportes esperados son:

- 1) Una cuantificación espacialmente explícita del potencial de captación en la ZMCM al 2020 y al 2040.
- 2) Una lectura comparativa entre escenarios climáticos que identifique cambios en el cuánto y el cuándo se capta agua de lluvia.
- 3) Insumos de diseño (rangos y criterios de almacenamiento; zonas de prioridad) para integrar SCALL en estrategias de adaptación urbana.

Finalmente, se discuten supuestos e incertidumbres (variabilidad entre modelos climáticos, extrapolación de techumbres y población, eficiencia global), proponiendo su lectura como estimaciones comparativas que guían decisiones y futuros análisis de sensibilidad.

Expuesto lo anterior, a continuación, se expresan los objetivos del presente trabajo.

Objetivo general

Evaluar el potencial de captación de agua de lluvia mediante SCALL en la ZMCM bajo condiciones actuales (2020) y en el horizonte 2040, integrando crecimiento urbano, proyección poblacional y cambios en precipitación, con el fin de orientar el dimensionamiento y la priorización territorial de estas medidas como estrategia de adaptación hídrica.

Objetivos particulares

- 1) Cuantificar el potencial de captación al 2020 a partir de la huella de techumbres y la precipitación histórica (1970–2000), expresándolo en $L \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$.
- 2) Proyectar al 2040 la superficie efectiva de techos y la población municipal, validando la extrapolación con datos recientes y estimando su efecto en la disponibilidad potencial.
- 3) Caracterizar el cambio en precipitación 2021–2040 bajo combinaciones GCM–SSP seleccionadas (CMIP6) y comparar sus señales con la línea base para identificar impactos en volumen anual y estacionalidad de la captación.
- 4) Integrar superficie captadora, precipitación proyectada y población 2040 para estimar la disponibilidad per cápita y delimitar umbrales operativos de factibilidad (p. ej., cercanía a $100 L \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$) por municipio.

1. LA PRECIPITACIÓN EN EL MARCO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

1.1 Cambio climático y recursos hídricos

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) define el cambio climático como “un cambio atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables”. El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) añade que este fenómeno denota un cambio identificable en el clima, observable a través de análisis estadísticos, que persiste durante un periodo prolongado, generalmente cifrado en décadas o más (Díaz Cordero, 2012).

El comportamiento del cambio climático está íntimamente vinculado al balance de energía de la tierra. La superficie terrestre absorbe la radiación solar (radiación solar de onda corta), la cual es redistribuida a través de las corrientes atmosféricas y oceánicas para balancear los contrastes térmicos entre el ecuador y los polos. Posteriormente, la energía recibida es reemitida al espacio en forma de radiación de onda larga, manteniendo así un equilibrio energético a largo plazo. Sin embargo, cualquier interrupción a este balance, ya sea por cambios a la radiación recibida o emitida, provocará cambios en la disponibilidad de energía radiativa, conocidos como forzamientos radiativos. Estos pueden ser positivos, contribuyendo al calentamiento de la superficie terrestre, o negativos, provocando una disminución en la temperatura (Martínez Fernández et al., 2006).

El aumento en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI), como el dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄), disminuye la eficiencia con la que la Tierra reemite la energía hacia el espacio. Esto provoca que parte de la radiación que normalmente escaparía al espacio

sea retenida y reemitida de vuelta a la superficie, aumentando la temperatura global. Este efecto de "atrapamiento" de calor es uno de los principales motores del cambio climático actual. Incluso si las emisiones de estos gases se estabilizaran, sus efectos perdurarían durante mucho tiempo debido a su larga permanencia en la atmósfera (Martínez Fernández et al., 2006).

Modelos de Circulación General

Los Modelos de Circulación General (GCMs, por sus siglas en inglés) son herramientas numéricas fundamentales para simular el comportamiento del sistema climático a nivel global. Basados en las leyes de la física, estos modelos permiten predecir cambios en el clima futuro al representar interacciones complejas entre los diferentes componentes del sistema climático, incluyendo la atmósfera, los océanos, la criosfera y la superficie terrestre (IPCC, 2013). Los GCMs dividen la Tierra en una cuadrícula tridimensional donde se calculan variables climáticas clave como la temperatura, la humedad, la presión atmosférica, las corrientes oceánicas y el contenido de vapor de agua. A partir de estas interacciones, los GCMs simulan la circulación atmosférica y oceánica global, así como otros procesos esenciales del clima.

Una característica crucial de los GCMs es la diversa cantidad de variables que estos modelos incluyen para representar el sistema climático de manera completa. Entre las principales variables que se modelan se encuentran la temperatura del aire, el contenido de vapor de agua, el nivel de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero, la presión atmosférica, el viento, la radiación solar entrante y saliente, la precipitación, y las corrientes oceánicas (McGuffie y Henderson-Sellers, 2014). Cada una de estas variables interactúa en diferentes niveles y escalas, permitiendo a los GCMs capturar el comportamiento del clima tanto en su variabilidad natural como en respuesta a cambios inducidos por el hombre. Estas interacciones complejas se modelan mediante ecuaciones diferenciales basadas en la termodinámica, la dinámica de fluidos y la física de la radiación, que son resueltas de manera iterativa a través del tiempo en los GCMs.

Por ejemplo, la radiación solar es una de las principales fuentes de energía del sistema climático, y su interacción con las capas atmosféricas y la superficie terrestre es modelada para evaluar cómo la energía es absorbida, reflejada y emitida de nuevo al espacio. Asimismo, se incluyen variables que representan procesos importantes como la formación de nubes, la evaporación del agua y el ciclo del carbono. Algunos modelos incorporan interacciones más detalladas, como la química atmosférica o el impacto de los aerosoles, que pueden influir en la reflectividad de las nubes y, por lo tanto, en el balance de energía de la Tierra (Randall et al., 2007).

La representación de estas variables puede cambiar de un modelo a otro, dependiendo de la resolución, los enfoques numéricos empleados y los objetivos específicos del modelo. A pesar de que todos los GCMs comparten una estructura básica similar, los detalles de cómo se modelan estas variables pueden diferir, afectando el grado de precisión en la simulación de ciertos fenómenos climáticos. Por ejemplo, algunos modelos pueden ofrecer una representación más detallada de las interacciones entre la atmósfera y el océano, mientras que otros se centran más en la dinámica del hielo o los procesos terrestres como la evapotranspiración y la interacción con la vegetación (Giorgi y Mearns, 1999).

Si bien los GCMs ofrecen una imagen detallada del sistema climático global, están limitados por su resolución espacial, la cual típicamente varía entre 100 y 300 kilómetros por celda. Esta resolución es adecuada para capturar fenómenos a gran escala, pero limita su capacidad para representar eventos climáticos locales o fenómenos regionales como monzones o tormentas convectivas (Giorgi y Mearns, 1999; IPCC, 2021). Además, los GCMs tienden a enfocarse en variables clave que afectan el clima a largo plazo, como las concentraciones de gases de efecto invernadero y el forzamiento radiativo, pero no siempre integran de manera precisa las interacciones a menor escala que ocurren en áreas específicas, lo que ha llevado al desarrollo

de Modelos Climáticos Regionales (RCMs) para mejorar la precisión en dichas escalas (Knutti y Sedláček, 2012).

Modelos Climáticos Regionales

Los Modelos Climáticos Regionales (RCMs, por sus siglas en inglés), como los GCMs, son herramientas que permiten simular el clima, pero a escalas más locales. Mientras que los GCMs tienen una resolución espacial relativamente baja, los RCMs permiten modelar los fenómenos climáticos de forma más precisa. Estos permiten representar tormentas, lluvias extremas y patrones de viento complejos que no son capturados por los GCMs debido a su escala. Los RCMs son particularmente útiles para estudios de impacto y adaptación, ya que proporcionan información climática más detallada y específica para regiones particulares.

Los RCMs se construyen “anidándose” dentro de los GCMs. En otras palabras, toman las condiciones iniciales y los límites que establece un GCM y los refinan a una escala más detallada para una región específica, mejorando la resolución espacial y temporal de las proyecciones. Esto permite generar una representación más precisa de fenómenos atmosféricos y geográficos como montañas, cuerpos de agua o áreas costeras, los cuales juegan un papel fundamental en el clima de una región. Sin embargo, los RCMs siguen dependiendo de los límites impuestos por los GCMs, lo que significa que cualquier sesgo o error presente en los modelos globales también afecta los resultados de los RCMs (Giorgi, 2019).

Al igual que los GCMs, los RCMs simulan diversas variables climáticas, pero lo hacen con mayor detalle espacial. La mayor resolución espacial de los RCMs permite también modelar procesos a menor escala, como la interacción entre el terreno y la atmósfera, que puede influir de manera significativa en los patrones de precipitación y temperatura. Además, los RCMs integran variables relacionadas con la cobertura del suelo y la vegetación, factores que resultan clave en áreas montañosas o zonas urbanas, donde las características locales tienen un impacto directo en los microclimas.

En México, los RCMs han sido utilizados para analizar los efectos del cambio climático a nivel regional, ya que el país tiene una gran diversidad de zonas climáticas y geográficas. Algunos de los modelos más utilizados en el país son el modelo PRECIS (Providing Regional Climates for Impacts Studies), desarrollado por el Hadley Centre, y el WRF (Weather Research and Forecasting Model). Estos modelos han sido clave para realizar estudios sobre el impacto climático en diferentes regiones. Por ejemplo, el modelo PRECIS se ha empleado para analizar escenarios de cambio climático en el norte de México, una zona especialmente vulnerable a la desertificación y la sequía. Por otro lado, el WRF ha sido utilizado para obtener información detallada sobre las precipitaciones en áreas montañosas y costeras (Conde et al., 2011). Ambos modelos han sido fundamentales para generar proyecciones climáticas regionales y locales, lo que ha apoyado la toma de decisiones en sectores cruciales como la agricultura y la gestión del agua.

A pesar de sus beneficios sobre los GCMs, los RCMs también tienen algunas limitaciones. Su precisión depende en gran medida de la calidad de los datos proporcionados por los modelos globales. Si el modelo global presenta sesgos o errores, estos se reflejarán también en el modelo regional. Además, los RCMs requieren una alta capacidad computacional debido a su mayor resolución y a la complejidad de los procesos que modelan, lo que hace que su uso se limite, en muchos casos, a investigaciones especializadas o a instituciones que cuentan con una infraestructura tecnológica avanzada.

Horizontes Temporales

La selección del periodo de referencia es esencial para la interpretación de los resultados de los modelos climáticos, pues este sirve como base para comparar las proyecciones futuras y calcular anomalías entre los valores observados y los del periodo de referencia. Generalmente, se utilizan periodos de referencia de 20 a 30 años, como lo recomienda el IPCC y la Organización Meteorológica Mundial (INECC, 2022). Estos rangos de tiempo permiten

suavizar las variabilidades climáticas interanuales y ofrecer una visión más precisa de las tendencias a largo plazo. Seleccionar un periodo de referencia adecuado es importante para evitar sesgos en la interpretación de los datos y asegurar que los resultados reflejen los cambios climáticos en el tiempo.

El IPCC reconoce tres horizontes temporales principales que permiten evaluar el impacto del cambio climático en distintos contextos: horizonte cercano (2030), horizonte medio (2050) y horizonte lejano (2100).

La Tabla 1.1 sintetiza el uso común de cada horizonte en análisis y planeación.

Tabla 1.1

Horizontes temporales y usos típicos en la literatura climática

Horizonte	Marca temporal	Propósito principal	Ejemplos de aplicación
Referencia (línea base)	p. ej., 1981–2010 o 1991–2020	Caracterizar el clima reciente, calcular anomalías y servir de base para corrección de sesgo.	Comparación consistente con periodos futuros; evaluación de cambios relativos.
Cercano	2030	Evaluar cambios inmediatos y apoyar decisiones operativas en el corto plazo.	Ajustes de manejo agrícola; programación de mantenimiento urbano; primeras acciones de adaptación.
Medio	2050	Explorar tendencias y requerimientos de adaptación en	Dimensionamiento preliminar de infraestructura hídrica y urbana; planes

		planeación sectorial.	sectoriales adaptación.	de
Lejano	2100	Considerar robustez mayor incertidumbre y estrategias de largo plazo.	bajo plazo; evaluación de límites de diseño; escenarios de mitigación/adaptación.	

Los horizontes más cortos, como el cercano a 2030, son ideales para evaluar cambios inmediatos y planificar respuestas rápidas a los primeros impactos del cambio climático. Estos horizontes son especialmente importantes para sectores que necesitan tomar decisiones en el corto plazo, como la agricultura o la planificación urbana a corto plazo (Conde y Gay, 2008).

Por otro lado, los horizontes medios y lejanos, como los de 2050 y 2100, son más adecuados para planificar infraestructura de largo plazo, como sistemas de gestión del agua, embalses, defensas contra inundaciones y otras iniciativas relacionadas con la adaptación al cambio climático (Lutz et al., 2016). En estos horizontes, las proyecciones climáticas a largo plazo permiten prever cambios significativos en patrones de temperatura, precipitación y eventos climáticos extremos, lo cual es crucial para el desarrollo de estrategias de mitigación que tomen en cuenta las posibles variaciones climáticas a futuro.

Trayectorias de Concentración Representativa (RCPs)

Las Trayectorias de Concentración Representativa (RCP, por sus siglas en inglés) son un conjunto de escenarios que representan diferentes trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero (GEI) y su impacto en el sistema climático global. Los RCPs son fundamentales en la modelación climática, ya que permiten proyectar posibles cambios futuros en la temperatura, la precipitación y otros indicadores clave en función de distintas tasas de emisión de GEI. Cada RCP se asocia a un nivel específico de forzamiento radiativo, es decir,

el desequilibrio energético en el sistema climático causado por los GEI, expresado en vatios por metro cuadrado (W/m^2), en comparación con los niveles preindustriales (Met Office, 2018).

Los RCPs presentan una variedad de futuros posibles, que van desde escenarios de bajas emisiones, como el RCP2.6, hasta escenarios de altas emisiones, como el RCP8.5. Estos escenarios están diseñados para cubrir un amplio rango de futuros, permitiendo evaluar los impactos que distintos niveles de mitigación o la falta de acciones podrían tener sobre el clima global (Van Vuuren et al., 2011).

A modo de referencia, la Tabla 1.2 presenta una comparación concisa de las RCP más utilizadas, con el forzamiento radiativo aproximado hacia 2100 y una descripción breve.

Tabla 1.2

RCP y características generales

RCP	Forzamiento radiativo hacia 2100 (W/m^2)	Descripción breve	Uso típico
RCP2.6	≈ 2.6	Mitigación estricta; las emisiones alcanzan un pico temprano y disminuyen de forma sostenida.	Evaluaciones con forzamiento bajo y medidas de adaptación en fases iniciales.
RCP4.5	≈ 4.5	Mitigación moderada; estabilización intermedia de las emisiones a mitad de siglo.	Planificación sectorial y análisis de riesgos a medio plazo.
RCP6.0	≈ 6.0	Mitigación limitada; estabilización en niveles más altos.	Exploración de impactos bajo emisiones

			sostenidas; análisis de sensibilidad.
RCP8.5	≈ 8.5	Altas emisiones persistentes, sin mitigación relevante.	Evaluación de límites de diseño y riesgos bajo condiciones más severas.

En la práctica, la elección de RCP suele combinarse con la comparación entre modelos para acotar rangos posibles de respuesta climática, utilizando métricas operativas como acumulados y estacionalidad de precipitación o la ocurrencia de rachas secas y eventos intensos.

Impacto del cambio climático en los patrones de precipitación

El cambio climático tiene efectos no solo en la radiación, sino en el ciclo hidrológico. A medida que la temperatura global aumenta, el ciclo hidrológico sufre alteraciones debido a la mayor evaporación del agua desde los continentes y los océanos, lo que modifica la cantidad, distribución y estacionalidad de las lluvias. Sin embargo, estos cambios no ocurren de manera homogénea, sino que dependen de factores como la circulación atmosférica, la influencia de fenómenos climáticos como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y las condiciones geográficas específicas de cada región (IPCC, 2021).

Uno de los efectos más evidentes del cambio climático en la precipitación es la alteración en su distribución espacial y temporal. Mientras que algunas regiones experimentan un incremento en la frecuencia e intensidad de las lluvias, otras sufren reducciones significativas en sus precipitaciones anuales, lo que exacerba problemas como la sequía y el estrés hídrico. En términos generales, las regiones cercanas al ecuador están viendo un aumento en las lluvias extremas, mientras que las zonas de latitudes medias y subtropicales, como el centro y norte de México, enfrentan una disminución en la cantidad de lluvia anual y una mayor variabilidad entre años secos y húmedos.

En América Latina, y particularmente en México, los modelos climáticos proyectan una disminución en la precipitación anual en gran parte del territorio, especialmente en el centro y norte del país, acompañado de un incremento en la variabilidad interanual (Martínez-Austria y Patiño-Gómez, 2012). En contraste, se prevé un aumento en la intensidad de las lluvias en algunas regiones tropicales, lo que podría derivar en un mayor riesgo de inundaciones. Esta redistribución del agua tendrá impactos significativos en la seguridad hídrica y en sectores como la agricultura, el abastecimiento urbano y la generación de energía hidroeléctrica.

En el caso de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), se han registrado cambios en la frecuencia y estacionalidad de las precipitaciones, con eventos de lluvia extrema más recurrentes y una posible reducción en la cantidad total de lluvia anual. Estas modificaciones, junto con el crecimiento urbano y la sobreexplotación de acuíferos, acentúan la vulnerabilidad de la región a fenómenos como inundaciones y escasez de agua.

1.2. Escenarios climáticos del CMIP6

El Proyecto de Intercomparación de Modelos de Clima Acoplados (CMIP, por sus siglas en inglés) es una iniciativa internacional establecida en 1995 por el Grupo de Trabajo en Modelos Acoplados (Working Group on Coupled Modelling, WGCM) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (World Climate Research Programme, WCRP). Su objetivo es coordinar y estandarizar las simulaciones realizadas con modelos climáticos de distintos centros de investigación, permitiendo la comparación de resultados y el perfeccionamiento de las proyecciones climáticas.

Dado que muchos procesos climáticos ocurren a escalas espaciales y temporales menores que la resolución de los modelos climáticos globales, cada modelo implementa simplificaciones únicas para representar estos fenómenos. Comparar los resultados de múltiples modelos

permite identificar patrones consistentes, evaluar diferencias y mejorar la comprensión de los posibles cambios en el clima futuro.

El CMIP proporciona un marco común para la ejecución de simulaciones climáticas estandarizadas, facilitando la comparación directa entre modelos y la identificación de tendencias en el sistema climático. Una de las principales aplicaciones de estos modelos es la proyección de escenarios climáticos futuros, en los que se establecen concentraciones específicas de gases de efecto invernadero, aerosoles y otros forzamientos climáticos para analizar sus efectos en variables como temperatura y precipitación.

El proyecto ha evolucionado a lo largo de distintas fases, cada una con nuevos protocolos experimentales, estándares mejorados y mecanismos de distribución de datos más avanzados. En sus primeras dos fases, el CMIP utilizó 18 modelos de circulación general en dos configuraciones principales: una simulación de control bajo condiciones preindustriales y una simulación "perturbada", en la que la concentración de dióxido de carbono se incrementaba en un 1% anual durante 80 años. Con el tiempo, la creciente necesidad de comprender mejor el sistema climático ha llevado a la expansión del CMIP, que actualmente cuenta con la participación de más de 50 centros de modelado en todo el mundo.

La fase más reciente del proyecto, CMIP6, introduce mejoras significativas en la resolución y representación de procesos climáticos. Entre los avances más importantes se encuentra la evolución de las Trayectorias de Concentración Representativa (RCPs) a las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSPs), un nuevo conjunto de escenarios que no solo considera la evolución de las concentraciones de GEI, sino que además incorpora trayectorias socioeconómicas que influyen en las emisiones futuras.

Mientras que los RCP describían únicamente la evolución proyectada de las concentraciones de gases de efecto invernadero, aerosoles y otros forzamientos climáticos sin considerar los

factores sociales y económicos que los impulsan, los SSP incorporan una visión más integral al vincular trayectorias de emisiones con narrativas socioeconómicas específicas.

En CMIP5, los escenarios RCP (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5) se diferenciaban en función de la cantidad de forzamiento radiativo alcanzado en el año 2100, medido en vatios por metro cuadrado (W/m^2). Sin embargo, estos escenarios no estaban explícitamente ligados a supuestos socioeconómicos, lo que limitaba su capacidad para evaluar los impactos del cambio climático en un contexto más amplio de desarrollo humano y político.

Para CMIP6, la comunidad científica desarrolló un nuevo marco basado en los SSP, los cuales representan diferentes trayectorias socioeconómicas globales y se combinan con escenarios de emisiones específicas para generar trayectorias climáticas comparables a los RCP de CMIP5 (Tabla 1.3). De esta manera, se establecieron las siguientes correspondencias entre los escenarios de ambas fases:

- **SSP1-2.6** (sostenibilidad global, desarrollo equilibrado) es equivalente a **RCP2.6**.
- **SSP2-4.5** (desarrollo intermedio, tendencias socioeconómicas actuales) se asemeja a **RCP4.5**.
- **SSP4-6.0** (desigualdad creciente entre regiones) se vincula con **RCP6.0**.
- **SSP5-8.5** (alto crecimiento económico basado en combustibles fósiles) mantiene la trayectoria de **RCP8.5**.

Tabla 1.3

SSP básicas, forzamiento radiativo y rasgos generales

SSP	Forzamiento radiativo hacia 2100 (W/m^2 , ejemplos)	Narrativa central	Consideraciones generales
SSP1 - Sostenibilidad	1.9 - 2.6	Transición hacia prácticas	Presiones de emisión

		sostenibles con baja desigualdad y cooperación internacional.	relativamente bajas; mayor capacidad institucional para mitigación y adaptación.
SSP2 - Tendencias intermedias	4.5	Continuidad de tendencias actuales con avances graduales y políticas moderadas.	Trayectoria intermedia; capacidades de mitigación y adaptación moderadas.
SSP3 - Rivalidad regional	7.0	Fragmentación y cooperación internacional limitada; prioridad a la seguridad regional.	Emisiones altas y vulnerabilidad elevada; restricciones significativas para adaptación.
SSP4 - Desigualdad	3.4 - 6.0	Sociedades con alta desigualdad y acceso diferenciado a tecnología y servicios.	Capacidades de mitigación y adaptación muy desiguales; riesgos concentrados en poblaciones vulnerables.
SSP5 - Desarrollo impulsado por combustibles fósiles	8.5	Crecimiento económico alto basado en uso intensivo de combustibles fósiles.	Emisiones elevadas si no hay mitigación; buena capacidad institucional con riesgos físicos altos sin medidas.

En términos generales, los escenarios de CMIP6 permiten una mejor representación de la incertidumbre en las proyecciones climáticas al considerar no solo el forzamiento radiativo final, sino también las trayectorias socioeconómicas que pueden influir en la evolución de las

emisiones. Esta mejora proporciona a los científicos y tomadores de decisiones herramientas más precisas para evaluar los impactos del cambio climático y desarrollar estrategias de adaptación y mitigación más informadas.

1.3. Uso de modelos climáticos en estudios hídricos

El uso de modelos climáticos en estudios hídricos ha sido clave para evaluar los impactos del cambio climático en la disponibilidad y gestión del agua. A nivel global, diversos estudios han utilizado modelos de CMIP6 para analizar cambios en el ciclo hidrológico y proyectar escenarios futuros de precipitación y sequía. Por ejemplo, Zhao y Dai (2021) evaluaron proyecciones hidroclimáticas y de sequía en el siglo XXI utilizando modelos de CMIP6, identificando tendencias de intensificación de eventos extremos en diversas regiones del mundo. De manera similar, Mesgari et al. (2022) analizaron la capacidad de estos modelos para proyectar la precipitación en la región MENAP (Medio Oriente, Norte de África, Afganistán y Pakistán) bajo diferentes escenarios de cambio climático.

En el contexto de Latinoamérica, estudios como el de Martí Ezpeleta et al. (2022) han abordado los retos del cambio climático en la disponibilidad de agua, destacando la importancia de modelos climáticos en la planificación de estrategias de adaptación y mitigación. Estos análisis han permitido estimar impactos diferenciados en distintas regiones y la necesidad de políticas específicas para enfrentar la variabilidad climática futura.

En cuanto a México, Cruz-González et al. (2025) evaluaron los cambios proyectados en temperatura y precipitación en el centro del país, destacando variaciones significativas en la distribución estacional del recurso hídrico. Asimismo, Andrade-Velázquez y Montero-Martínez (2023) realizaron un downscaling estadístico de la precipitación en el sur y sureste de México, proporcionando información detallada para la gestión del agua en estas regiones.

En la revisión de antecedentes se observa que los estudios climáticos e hidrológicos que abordan el Valle de México han trabajado con delimitaciones metropolitanas previas, como la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), que no reflejan la configuración territorial actualmente reconocida para la ZMCM.

La actualización metodológica de Metrópolis de México 2020—coordinada por CONAPO, SEDATU e INEGI—identifica y caracteriza metrópolis bajo criterios funcionales y de movilidad cotidiana, formalizando la ZMCM como el marco territorial vigente para planeación y análisis comparables, distinto de delimitaciones anteriores. Este cambio no es solo de nombre: modifica la agregación espacial y, por tanto, los promedios, extremos e inequidades intraurbanas relevantes para la hidrología urbana. Trabajar con la delimitación vigente permite alinear las evaluaciones climáticas con instrumentos locales de gestión y con la dinámica actual de urbanización y movilidad.

El uso conjunto de proyecciones climáticas y Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) ofrece un marco operativo para enfrentar la doble condición de la ZMCM: precipitaciones intensas que rebasan la capacidad hidráulica del sistema de drenaje pluvial, e intermitencias en el abasto a lo largo del año.

Las métricas derivadas de los modelos climáticos (acumulados anuales y estacionales, distribución intraanual, duración de rachas secas y frecuencia de eventos intensos) se pueden traducir a parámetros de diseño (áreas de captación, volúmenes de almacenamiento) que orienten el dimensionamiento de los SCALL. La utilidad práctica de esta articulación ya ha sido reconocida en la política pública local mediante Programas de Cosecha de Lluvia en la Ciudad de México, que pueden integrarse como medidas de adaptación y mitigación de riesgos a escala predial y barrial (SEDEMA, 2024a, 2024b).

El contexto reciente de la ZMCM refuerza la pertinencia de este enfoque dual. En la temporada lluviosa de septiembre de 2025, la Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil emitió alertas por lluvias fuertes, y se registraron inundaciones relevantes en corredores como Picacho–Ajusco y Periférico Sur (Tlalpan), con reportes de acumulaciones superiores a 50 mm en estaciones puntuales; además, se documentaron encharcamientos y afectaciones a vialidades y vivienda (SGIRPC CDMX, 2025; Infobae, 2025; N+, 2025). Estos episodios ilustran la presión sobre un sistema pluvial urbano con alta impermeabilización, donde los SCALL pueden interceptar parte del volumen de tormenta, reducir picos de gasto hacia el drenaje y retrasar escurrimientos locales.

Por el lado opuesto del ciclo anual, la ciudad ha enfrentado intermitencias en el abasto y tandeo en distintos periodos recientes; por ejemplo, a inicios de 2024 se reportaron reducciones programadas y distribución por turnos en colonias específicas, en el contexto de ajustes de caudal del Sistema Cutzamala; también se registraron suspensiones temporales por mantenimiento (El Financiero, 2024; Proceso, 2024; CONAGUA, 2024). Si bien en 2025 el almacenamiento del sistema muestra recuperación por lluvias extraordinarias, con niveles superiores a los de 2024, persiste la necesidad de gestión de la demanda y de soluciones descentralizadas que fortalezcan la seguridad hídrica urbana (CONAGUA, 2025; El País, 2025). En este sentido, los SCALL aportan agua para usos no potables durante estiaje y reducen la dependencia de la red, mientras la planeación basada en modelos permite ajustar capacidades a la señal pluviométrica esperada.

2. SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA

2.1 Historia y evolución de los SCALL

Historia

A lo largo del tiempo, diversas civilizaciones alrededor del mundo desarrollaron estrategias ingeniosas para recolectar y almacenar agua de lluvia, adaptándose a sus condiciones climáticas, geográficas y culturales. Estos sistemas tempranos no solo respondían a la necesidad básica de abastecimiento, sino que también reflejaban un conocimiento profundo del entorno y una planificación sofisticada para asegurar la resiliencia hídrica a largo plazo.

En la India, por ejemplo, desde hace más de 2,000 años se han utilizado estructuras conocidas como baolis (pozos escalonados) y kunds (reservorios excavados), diseñadas para captar y almacenar agua de lluvia durante la temporada de monzones. Estas construcciones, además de su función hidráulica, eran espacios de encuentro social y espiritual, integrándose al tejido urbano y cultural de muchas regiones del subcontinente (Agarwal y Narain, 1997).

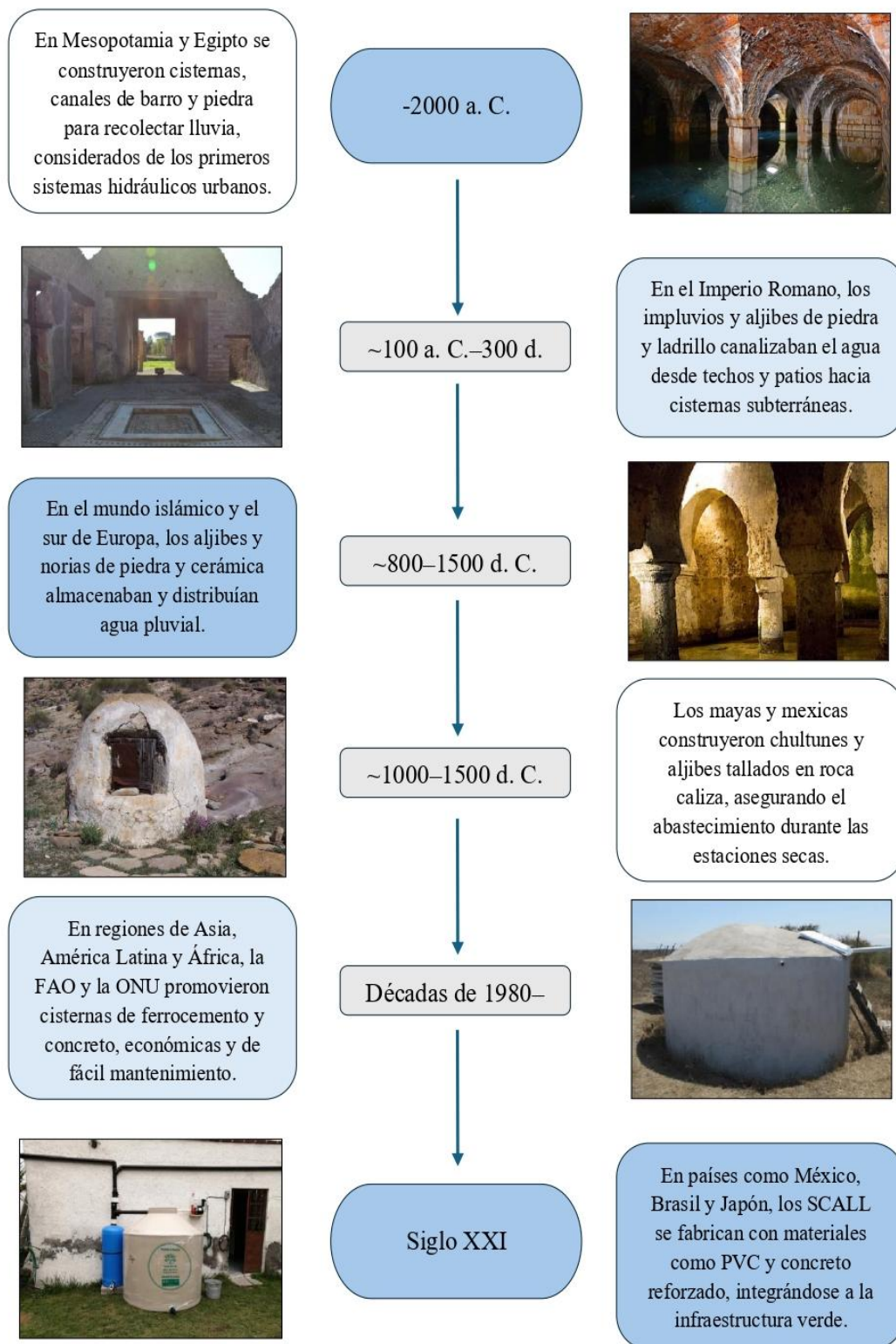
En regiones semiáridas del Medio Oriente, como Yemen, se desarrollaron desde la antigüedad cisternas subterráneas y terrazas agrícolas con canales integrados que captaban y dirigían el agua pluvial hacia zonas de cultivo o almacenamiento. La ciudad antigua de Shibam, por ejemplo, cuenta con sistemas tradicionales que hoy en día funcionan como complemento al abastecimiento moderno (UNESCO, 2004).

De forma paralela, en la cuenca mediterránea, los romanos perfeccionaron acueductos y sistemas de captación en techos, conectados a aljibes de piedra caliza. Estos eran comunes en villas rurales y ciudades como Pompeya, donde los hogares recolectaban agua pluvial en impluvios (pequeñas depresiones en patios) que la dirigían a cisternas subterráneas (Hodge, 2002).

La Figura 2.1 presenta un diagrama de flujo que resume la evolución histórica de los SCALL, mostrando cómo el principio de aprovechar localmente un recurso natural ha perdurado a lo largo de la historia humana y continúa siendo relevante en la actualidad. Estos ejemplos demuestran que la captación de agua de lluvia no es una práctica reciente, sino una tecnología ancestral que ha acompañado el desarrollo de las sociedades humanas desde sus orígenes. A lo largo del tiempo, cada civilización adaptó sus sistemas a las condiciones locales de clima, relieve y cultura, logrando soluciones sostenibles con los recursos disponibles. Esta herencia técnica y conceptual constituye la base sobre la cual se han desarrollado las estrategias modernas de captación pluvial, que retoman los mismos principios de aprovechamiento local, autosuficiencia y gestión integral del agua.

Figura 2.1

Evolución histórica de los SCALL



Evolución

La evolución de los SCALL refleja el proceso mediante el cual las sociedades han aprendido a aprovechar un recurso natural renovable para responder a las necesidades de abastecimiento y

resiliencia hídrica. A lo largo del tiempo, estas prácticas han pasado de ser soluciones básicas de subsistencia a constituirse en herramientas estratégicas dentro de la gestión del agua y la planificación urbana sostenible.

En sus primeras implementaciones, los SCALL consistían en estructuras sencillas: canaletas, depósitos o cisternas elaboradas con materiales locales como barro, piedra o cal (Como se muestra en la Figura 2.2). Estas configuraciones cumplían una función elemental y presentaban limitaciones en cuanto a durabilidad, higiene y capacidad de almacenamiento (Pacey y Cullis, 1986; Gould y Nissen-Petersen, 1999). Con el paso de las décadas, su uso dejó de ser principalmente rural y de subsistencia para convertirse en un componente activo del uso eficiente del agua en zonas urbanas.

Figura 2.2

Cisterna elaborada con piedra y barro en Pompeya, Roma



En este contexto, los SCALL comenzaron a vincularse con el concepto de infraestructura verde, es decir, un conjunto de estrategias que integran procesos naturales en la planificación urbana

para mejorar la calidad de vida y reducir la vulnerabilidad ambiental. Ciudades de Asia y Oceanía adoptaron tempranamente este enfoque: en India, la captación pluvial se incorporó a las políticas de desarrollo urbano para enfrentar la sobreexplotación de acuíferos (UN-Habitat, 2018); mientras que, en Australia, su integración en la normativa residencial permitió reducir entre 30 y 40 % el consumo de agua potable en viviendas suburbanas (Queensland Government, 2007).

En América Latina, los avances también fueron notables. En Brasil, el programa Água de Chuva para Consumo Humano instaló cisternas de ferrocemento para abastecer a comunidades durante los meses secos (Figueiredo, Ribeiro y Silva, 2017). En México, la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA) implementó el programa Cosecha de Lluvia, que entre 2019 y 2024 instaló más de 60 000 sistemas en la Ciudad de México, fortaleciendo la seguridad hídrica en zonas vulnerables (SEDEMA, 2024).

Estos ejemplos demuestran que la evolución de los SCALL no ha sido uniforme ni lineal, sino el resultado de la interacción entre factores tecnológicos, sociales y ambientales. De ser prácticas empíricas, pasaron a consolidarse como soluciones integradas dentro de políticas públicas de sustentabilidad hídrica. Esta transición no solo transformó su propósito, sino también su diseño y componentes técnicos, los cuales determinaron su durabilidad, eficiencia y facilidad de operación.

Evolución en los métodos de instalación y materiales usados

La modernización de los SCALL se ha desarrollado principalmente a través de la mejora en los métodos de instalación y en los materiales utilizados para su construcción. Estos cambios han permitido optimizar la captación, almacenamiento y calidad del agua, además de facilitar su adaptación a contextos rurales y urbanos con distintas condiciones climáticas y espaciales.

Métodos de instalación

En sus primeras versiones, los SCALL eran rudimentarios, contruidos con canaletas de madera o metal conducían el agua hacia depósitos o aljibes abiertos. Con el tiempo, se incorporaron componentes especializados que mejoraron la eficiencia hidráulica y la calidad sanitaria del agua recolectada. Entre los más importantes se encuentran los separadores de primera lluvia, que eliminan los primeros milímetros de precipitación donde se concentran partículas y contaminantes; los filtros autolimpiables, que reducen la frecuencia de mantenimiento; y los sensores de nivel, que permiten controlar el volumen de almacenamiento y distribuir el agua hacia los puntos de uso.

La estandarización de estos procedimientos fue fundamental para su expansión. Manuales técnicos como el Texas Manual on Rainwater Harvesting (TWDB, 2011) y las guías publicadas por la FAO (2021) establecen criterios de diseño que garantizan la seguridad y eficiencia de los sistemas. En países como Japón se construyeron los sistemas de captación llamados “Ronjinson” en el distrito de Mukojim (como se muestra en la Figura 2.3). El sistema capta el agua de lluvia proveniente del techo de la vivienda, la cual se almacena en un pozo subterráneo. Para su aprovechamiento, el agua se extrae mediante una bomba manual.

Figura 2.3

Ronjinson: Sistema de captación de agua de lluvia en Japón



Materiales usados

Los materiales son un componente determinante en la eficiencia, durabilidad y seguridad de los SCALL. En las primeras implementaciones se usaban principalmente materiales locales como piedra, barro o cal, fáciles de obtener, pero poco resistentes al desgaste o a la contaminación del agua. Con el tiempo, la evolución tecnológica permitió la adopción de materiales más avanzados, como el concreto reforzado, que aumentó la capacidad de almacenamiento y prolongó la vida útil de las estructuras (Figueiredo, Ribeiro y Silva, 2017).

Posteriormente, el desarrollo de polímeros como el cloruro de polivinilo (PVC) y el polietileno de alta densidad (HDPE) transformó por completo el diseño de los sistemas. Estos materiales, más ligeros y resistentes a la corrosión, facilitaron la fabricación de cisternas modulares y kits domésticos de fácil instalación. En países como Australia, la integración de estos materiales en la normativa de vivienda redujo entre un 30 % y un 40 % la demanda de agua potable en hogares suburbanos (Queensland Government, 2007).

Por su parte, el acero galvanizado y el fibrocemento se consolidaron como opciones para techos captadores y tanques medianos, mientras que los recubrimientos epóxicos y las pinturas impermeabilizantes aumentaron la calidad sanitaria del almacenamiento. Estas mejoras,

combinadas con la estandarización de componentes, han permitido que los SCALL sean más eficientes, higiénicos y fáciles de mantener.

La Tabla 2.1 resume la evolución de los materiales empleados en los SCALL, desde los compuestos tradicionales hasta los polímeros modernos. Se observa un cambio progresivo hacia estructuras más duraderas, modulares y sanitariamente seguras, adaptadas tanto al ámbito rural como al urbano.

Tabla 2.1

Evolución de los materiales utilizados en los SCALL

Material/ Etapa	Características principales	Limitaciones	Ejemplo o referencia
Materiales tradicionales (barro, piedra, cal)	Bajo costo, disponibilidad local y facilidad de reparación.	Material frágil, deterioro rápido, riesgo sanitario elevado.	Aljibes rurales en Mesoamérica y sistemas tradicionales en India.
Materiales de transición (concreto reforzado, ferrocemento)	Alta resistencia, mayor durabilidad, capacidad de gran volumen.	Peso elevado, transporte e instalación difíciles.	Cisternas comunitarias en Brasil y México.
Materiales modernos (PVC, HDPE, acero galvanizado, fibra de vidrio)	Ligeros, resistentes a la corrosión, fácil montaje, posibilidad de modularidad.	Sensibles a radiación UV sin protección; requieren mantenimiento.	Kits urbanos modulares en Australia, Japón y Alemania.

La selección adecuada de materiales no solo mejora la calidad del agua captada, sino que también define la sostenibilidad y la viabilidad económica del sistema. Los avances en diseño e instalación, junto con los nuevos materiales, han permitido que los SCALL sean más accesibles y funcionales para distintos contextos, permitiendo que el aprovechamiento pluvial se posicione como una alternativa real ante la creciente escasez hídrica.

2.2 Implementación y beneficios en entornos urbanos

La implementación de los SCALL en zonas urbanas, especialmente en ciudades densamente pobladas como la ZMCM, requiere un enfoque integral que articule criterios técnicos, sociales y urbanísticos. Aunque sus beneficios son ampliamente reconocidos, su éxito depende de la forma en que se planifiquen, adapten e integren a la infraestructura existente.

El primer paso recomendable es su incorporación desde la fase de diseño arquitectónico y urbano. Incluir los SCALL como parte del proyecto constructivo en desarrollos habitacionales, escuelas, hospitales o instalaciones públicas optimiza la eficiencia, reduce costos de instalación e integra armónicamente sus componentes (canaletas, filtros, cisternas y sistemas de distribución).

Esto es particularmente viable en construcciones nuevas o programas de vivienda social, donde se pueden establecer estándares técnicos mínimos desde el inicio. El programa Cosecha de Lluvia de la SEDEMA fija criterios basados en la superficie de captación disponible, lo que permite escalar su integración (SEDEMA, 2022).

En países como Alemania, se ha demostrado que la planeación desde el diseño urbano contribuye a una implementación más eficiente. Ciudades como Berlín incorporan la captación pluvial en sus normativas de construcción, otorgando incentivos fiscales a edificaciones con techos verdes o sistemas de recolección de agua (European Commission, 2018). Este tipo de estrategias evidencia cómo la regulación puede acelerar la adopción de tecnologías sostenibles.

En edificaciones existentes, la adaptación progresiva constituye una vía práctica. Esta estrategia implica evaluar el potencial de techos y azoteas, modificar la infraestructura pluvial, instalar sistemas modulares y asegurar su compatibilidad con el uso previsto del agua. En espacios de uso intensivo como escuelas o centros de salud, la recolección se destina principalmente a limpieza, riego o servicios sanitarios, generando ahorros en el consumo y fomentando una cultura de aprovechamiento responsable dentro de la comunidad.

Un ejemplo destacado se encuentra en Japón, donde la ciudad de Tokio promueve desde 2003 el uso de agua de lluvia en escuelas y estaciones mediante sistemas automatizados de filtrado y almacenamiento, complementados con campañas de educación ambiental (MLIT, 2019). Este enfoque demuestra cómo la sensibilización social es tan importante como la infraestructura técnica para garantizar el éxito de los SCALL.

Condiciones y retos para la implementación urbana

El éxito de los SCALL en entornos urbanos está condicionado por factores físicos, sociales, institucionales y económicos, lo que obliga a abordarlos de manera integral. Entre ellos, la disponibilidad de superficies captadoras es uno de los más determinantes. En áreas con construcciones verticales y techos reducidos, el volumen de captación puede verse limitado. Sin embargo, investigaciones como la de Domínguez (2022) en Iztapalapa muestran que es posible aprovechar superficies subutilizadas como los patios interiores, cubiertas de estaciones de transporte y techos de escuelas, con el fin de instalar sistemas modulares con resultados relevantes.

La calidad del agua recolectada es otro elemento clave. Aunque la lluvia suele ser de baja contaminación en origen, en zonas urbanas puede arrastrar partículas, contaminantes atmosféricos o residuos sólidos. Por ello, el prefiltrado y el mantenimiento periódico son indispensables, sobre todo si se destina a usos no potables. En la Ciudad de México, Cosecha de Lluvia establece lineamientos de filtración y tratamiento básico, priorizando su uso en sanitarios y limpieza doméstica (SACMEX, 2023).

En Brasil, la aplicación de sistemas descentralizados en ciudades como São Paulo y Curitiba ha demostrado que los SCALL pueden reducir la presión sobre las redes públicas y fomentar la gestión comunitaria del agua, especialmente en zonas con acceso irregular al servicio (ANA, 2020). Estas experiencias internacionales reflejan que la participación social y el respaldo institucional son factores decisivos para el éxito de su implementación.

Beneficios ambientales, sociales y económicos

Los SCALL permiten atender de manera simultánea problemas como el estrés hídrico, la desigualdad en el acceso al agua, los altos costos operativos y la degradación ambiental.

Ambientalmente, reducen el volumen de escurrimientos superficiales, disminuyendo el riesgo de inundaciones y la presión sobre sistemas de drenaje, especialmente en zonas con infraestructura obsoleta o insuficiente (SEMARNAT, 2021). Además, al evitar el transporte y tratamiento desde fuentes lejanas, se reduce el consumo energético y la huella de carbono asociada al ciclo urbano del agua, alineándose con políticas de sostenibilidad y resiliencia climática.

Socialmente, mejoran la equidad en el acceso al agua, particularmente en zonas con servicio irregular. También fomentan la participación comunitaria en su instalación y mantenimiento, fortaleciendo la cohesión social y la educación ambiental, sobre todo en contextos escolares (García y Solís, 2020).

Económicamente, los SCALL generan ahorros directos en el consumo de agua potable y en el pago de tarifas. En edificios públicos o comunitarios, la reducción de costos operativos libera recursos para otras necesidades. A escala urbana, disminuyen la presión sobre el sistema centralizado, reduciendo costos operativos y aplazando inversiones en grandes infraestructuras.

Criterios técnicos y normativos para su implementación urbana

La consolidación de los SCALL en ciudades depende de una planificación técnica rigurosa y de un marco normativo claro que regule su diseño, instalación y operación. A diferencia del medio rural, donde existe mayor flexibilidad espacial, en entornos urbanos es necesario garantizar eficiencia hidráulica, seguridad sanitaria y sostenibilidad operativa.

El dimensionamiento del sistema debe considerar variables como precipitación media anual, área efectiva de captación, capacidad de almacenamiento y demanda estimada. En la ZMCM,

la precipitación puede variar entre las diferentes alcaldías; por ejemplo, pueden caer hasta 600 mm anuales en Iztapalapa y más de 1,200 mm en Cuajimalpa (CONAGUA, 2021). Estas diferencias condicionan la capacidad de almacenamiento y subrayan la importancia de adaptar los sistemas al contexto local.

Existen varias recomendaciones para la instalación de los SCALL, comenzando por un techo limpio, ligeramente inclinado y construido con materiales inertes como lámina galvanizada, teja de barro o concreto pulido. Superficies como asfalto o láminas oxidadas disminuyen la calidad del agua (UN-Habitat, 2018). Además, los sistemas deben contar con *first flush* para descartar los primeros milímetros de lluvia, donde se concentra la mayor carga de contaminantes.

En cuanto al almacenamiento, se recomienda realizar un cálculo de balance hídrico simple, como el método de consumo mensual ajustado a la captación mensual (TWDB, 2011). Por ejemplo, una vivienda de cuatro personas con 80 m² de captación y 850 mm de precipitación media puede recolectar alrededor de 54,400 litros anuales, cubriendo entre el 25 % y el 50 % de las necesidades no potables (CONAGUA, 2020).

A nivel nacional, la Ciudad de México ha avanzado con medidas como la modificación de la Ley del Derecho al Acceso, Disposición y Saneamiento del Agua (Gaceta Oficial CDMX, 2019), que puede establecer la obligatoriedad de instalar SCALL en nuevas construcciones ubicadas en zonas con estrés hídrico. Asimismo, Cosecha de Lluvia ha instalado más de 60,000 sistemas en viviendas de Iztapalapa, Tláhuac y Xochimilco (SEDEMA, 2024).

A pesar de estos avances, persisten vacíos regulatorios. La NOM-011-CONAGUA-2015 regula la eficiencia en el uso del agua, pero no establece lineamientos específicos para SCALL. La Ley de Aguas Nacionales tampoco define criterios técnicos obligatorios para su implementación urbana, lo que provoca que muchas instalaciones carezcan de certificación

sanitaria. En este sentido, expertos proponen armonizar la normativa urbana con estándares internacionales que incluyan manuales de instalación, protocolos de mantenimiento y capacitación comunitaria (Martínez et al., 2023).

2.3 Marco normativo y políticas de captación de agua de lluvia

El establecimiento de un marco normativo sólido constituye una condición necesaria para que los SCALL dejen de ser percibidos únicamente como soluciones aisladas o experimentales, y logren consolidarse como parte de una política pública de alcance nacional. En México, la regulación de estos sistemas aún se encuentra en una fase de inicio, si bien existen iniciativas locales con resultados tangibles, todavía no se dispone de una estrategia nacional que otorgue certidumbre técnica y jurídica a su implementación. Esta falta de lineamientos ha limitado su expansión, a pesar de que los SCALL representan una alternativa viable y urgente frente al creciente estrés hídrico.

A nivel internacional, diversos países han reconocido la importancia de contar con una regulación específica para promover el aprovechamiento pluvial. Por ejemplo, India estableció la obligatoriedad de instalar sistemas de captación en edificaciones nuevas de ciudades como Chennai y Nueva Delhi, integrando este requisito dentro de sus códigos urbanos desde principios de los años 2000 (Centre for Science and Environment [CSE], 2019). De forma similar, Australia incorporó la recolección pluvial en su Building Code of Australia desde 2003, lo que ha permitido que miles de viviendas cuenten con sistemas domésticos para usos no potables (Australian Government, 2015).

Marco legal en el ámbito nacional

En México, la Ley de Aguas Nacionales (LAN), vigente desde 1992, es el principal instrumento jurídico en materia de agua. Su enfoque se centra en la administración del recurso y en la

regulación de concesiones de uso, sin incorporar disposiciones específicas sobre la captación pluvial.

Sin embargo, no existen normas oficiales o aspectos clave para regular los SCALL y su aplicación, así como la calidad del agua recolectada, el diseño de la infraestructura o los mecanismos de potabilización. Por ello, diversos especialistas han planteado la necesidad de desarrollar una Norma Oficial Mexicana específica para la captación pluvial, que defina criterios mínimos de instalación, operación y control sanitario (Martínez, López y Hernández, 2023). La existencia de una norma de este tipo podría concientizar a la ciudadanía sobre la importancia de los SCALL.

Regulación y programas en la Ciudad de México

La Ciudad de México es la entidad con mayores avances en este campo. En 2019 se reformó la Ley del Derecho al Acceso, Disposición y Saneamiento del Agua, incorporando la obligatoriedad de instalar sistemas de captación pluvial en determinadas construcciones nuevas, sobre todo en zonas con déficit hídrico (Gaceta Oficial CDMX, 2019). Este cambio normativo representa un hito, pues convirtió a los SCALL en un requisito obligatorio en ciertos casos, pasando de ser una opción voluntaria a una medida institucionalizada.

Experiencias internacionales, como la de Australia, muestran que la combinación de regulación, financiamiento y educación ambiental puede consolidar una política pública efectiva. Los programas de Water Sensitive Urban Design (WSUD) en ciudades como Brisbane y Melbourne integran los SCALL con áreas verdes, drenaje sostenible y normativas locales de construcción (Brown et al., 2016). Como se muestra en la Tabla 2.2, este modelo podría servir como referencia para fortalecer los programas mexicanos hacia una visión integral y de largo plazo.

Estos logros demuestran cómo una política pública clara, acompañada de financiamiento y participación social, puede favorecer una adopción amplia y sostenida. Sin embargo, al tratarse de un programa circunscrito a una sola entidad federativa, su alcance sigue siendo limitado frente a los desafíos de carácter nacional.

Tabla 2.2

Comparativa de políticas de captación pluvial en distintos contextos.

País / Región	Tipo de regulación o programa	Nivel de aplicación	Avances o resultados relevantes
México	Programas locales (Cosecha de Lluvia), sin norma nacional específica.	Local (CDMX)	Más de 60,000 sistemas instalados (2019–2024); impulso a la capacitación comunitaria.
India	Captación obligatoria en edificaciones nuevas según códigos urbanos.	Nacional / estatal	Aumento del 25 % en reservas urbanas de agua de lluvia en Chennai y Delhi.
Australia	Integración de SCALL en el Building Code of Australia y programas WSUD.	Nacional / local	Ahorros de hasta 35 % en consumo de agua potable doméstica.
Alemania	Incentivos fiscales para viviendas y normativas de drenaje urbano sostenible.	Municipal / regional	Reducción de escurrimientos pluviales y promoción de techos verdes.
Brasil	Programas de gestión comunitaria del agua en São Paulo y Curitiba.	Local / regional	Reducción de presión sobre redes públicas y fortalecimiento social.

Retos pendientes

A pesar de los avances en la capital, a nivel federal persisten varios desafíos:

- Ausencia de un marco normativo nacional específico, que establezca estándares homogéneos para el diseño, la calidad y la operación de los SCALL.
- Desigualdad territorial, ya que mientras la Ciudad de México cuenta con políticas y programas sólidos, en otras entidades los proyectos dependen de esfuerzos aislados o comunitarios.

Estos retos evidencian la necesidad de una política integral que incorpore a los SCALL dentro de la gestión hídrica estructural, trascendiendo el ámbito local y contribuyendo a la resiliencia frente al cambio climático.

2.4 Factores que afectan la eficiencia de los SCALL

La eficiencia de los SCALL no depende únicamente de su instalación, sino también de factores técnicos, ambientales y sociales que condicionan su rendimiento y aceptación en el entorno urbano.

En primer lugar, las condiciones climáticas y la variabilidad en la precipitación determinan la disponibilidad del recurso. En regiones con lluvias estacionales, como el Valle de México, los sistemas requieren almacenar agua durante los meses húmedos para cubrir la demanda en temporada seca. La eficiencia depende tanto del volumen anual de lluvia como de la intensidad y frecuencia de los eventos pluviales, factores que influyen directamente en el dimensionamiento y el mantenimiento del sistema (CONAGUA, 2020). En general, los SCALL muestran mejores resultados en climas tropicales o templados con lluvias distribuidas a lo largo del año, mientras que las regiones áridas enfrentan mayores pérdidas por evaporación y periodos de inactividad.

Otro factor esencial es la superficie y las características del área de captación. Techos amplios y contruidos con materiales inertes, como láminas metálicas o tejas esmaltadas, permiten recolectar volúmenes de agua más limpios y constantes. En cambio, materiales porosos como el concreto sin sellar o las láminas oxidadas reducen la eficiencia y afectan la calidad del agua. Estudios de la FAO (2021) estiman que las superficies metálicas presentan una eficiencia media del 85 %, mientras que las de concreto alcanzan alrededor del 60 %. Incluso superficies reducidas, a partir de 4 m², pueden generar aportes útiles en entornos urbanos densos (García y cols., 2021).

Aun con materiales adecuados, la eficiencia puede verse comprometida por la calidad del agua recolectada. La contaminación atmosférica, el polvo y la presencia de fauna urbana incrementan la turbidez y la materia orgánica, lo que obliga a procesos de filtrado y a un mantenimiento más frecuente. En este sentido, la limpieza y el mantenimiento regulares son indispensables para garantizar un aprovechamiento seguro y sostenido del recurso (UNAM, 2019). En la ZMCM, donde los techos suelen estar expuestos a polvo y partículas suspendidas, los sistemas con separación de la primera lluvia (first flush) mejoran de forma notable la calidad del agua almacenada.

Asimismo, la capacidad de almacenamiento y distribución determina la utilidad práctica del agua recolectada. Un sistema subdimensionado ocasiona pérdidas por escurrimiento, mientras que uno sobredimensionado incrementa los costos de instalación sin mejorar el rendimiento. Por ello, el diseño debe equilibrar la demanda prevista, la precipitación local y la superficie disponible. En contextos urbanos, los balances hídricos mensuales son una herramienta útil para ajustar el tamaño del sistema a las condiciones específicas de cada sitio, con mejoras medibles en su desempeño (IHWRM, 2018).

Finalmente, la aceptación social y cultural constituye un factor decisivo. La percepción de que el agua de lluvia no es apta para el consumo o que su uso representa un riesgo sanitario limita su adopción, incluso cuando los análisis demuestran que cumple con estándares de calidad. La capacitación comunitaria, las campañas de información y los programas educativos son elementos clave para aumentar la confianza y fomentar la participación ciudadana (Domínguez y Hernández, 2020). Tal como se resume en la Tabla 2.3, donde la eficiencia global depende de condiciones climáticas, especificaciones de diseño, operación y factores sociales.

Tabla 2.3

Factores determinantes en la eficiencia de los SCALL.

Categoría	Factor evaluado	Impacto en la eficiencia (%)	Observaciones / Ejemplo
Climático	Régimen e intensidad de lluvia	40 - 90 %	Mayor eficiencia en zonas húmedas; pérdidas por evaporación en periodos secos.
Técnico	Material del área de captación	60 - 90 %	Metálicos 85 %, tejas esmaltadas 75 %, concreto 60 %.
Operativo	Mantenimiento y limpieza	70 - 95 %	Reducción de turbidez y colmatación; uso de <i>first flush</i> aumenta la eficiencia.
Diseño hidráulico	Dimensionamiento del sistema	65 - 90 %	Balance hídrico ajustado mejora el rendimiento anual.
Social	Aceptación y participación comunitaria	Variable	Capacitación e información aumentan el uso sostenido del sistema.

En conjunto, estos factores evidencian que la eficiencia de los SCALL responde a una interacción dinámica entre condiciones ambientales, decisiones técnicas y factores sociales.

3. ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Contexto de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)

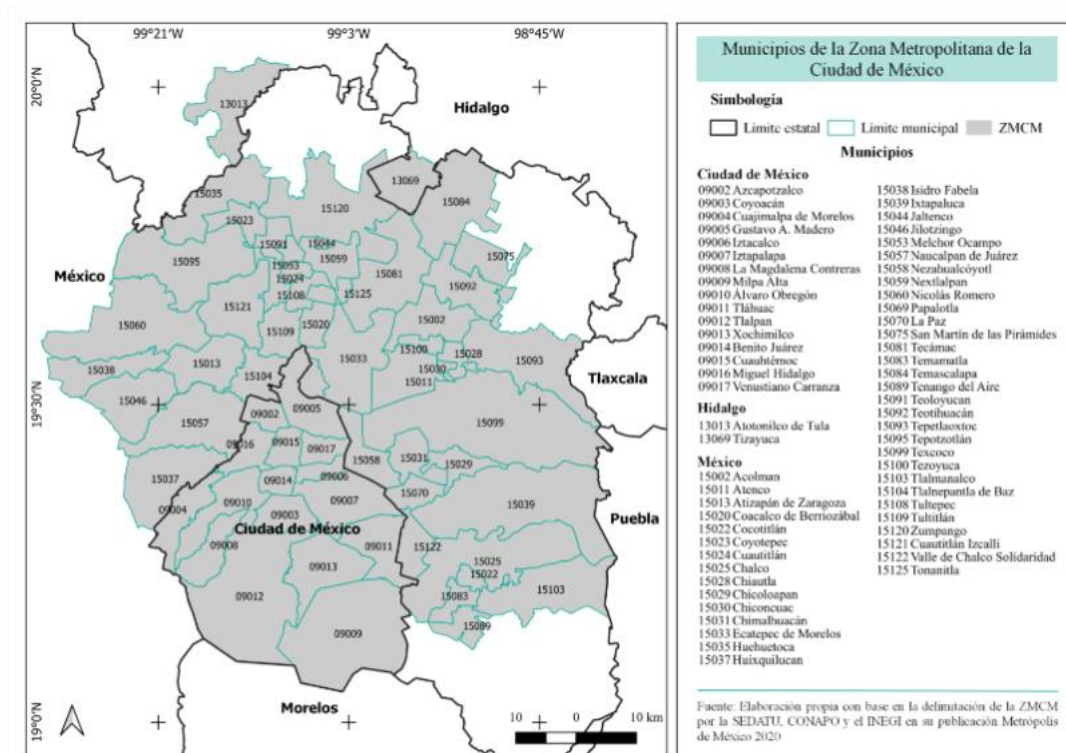
La ZMCM se integra por 63 unidades político-administrativas: las 16 alcaldías de la Ciudad de México, 45 municipios del Estado de México y 2 municipios de Hidalgo (véase Figura 3.1). Esta configuración corresponde a la actualización metodológica de Metrópolis de México 2020, coordinada por SEDATU, CONAPO e INEGI, que define las metrópolis con base en criterios funcionales y de movilidad cotidiana. Esta base común permite comparabilidad nacional y alinea la planeación sectorial con el ámbito territorial donde ocurren las interacciones urbanas.

El fenómeno metropolitano en México es de suma importancia para el desarrollo y la planificación nacional. Las metrópolis, como complejas concentraciones urbanas, tienen un rol esencial en la economía y la demografía del país, generando más del 80% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional y albergando al 65.5% de la población. Áreas como la ZMCM no solo son fundamentales para el crecimiento económico, sino que también representan puntos de encuentro cultural y tienen una alta demanda de servicios y recursos debido a su acelerado crecimiento. Por esta razón, resulta esencial analizar y comprender estas áreas metropolitanas de manera integral.

Ubicada en la zona central del país, entre las coordenadas 99°32' y 98°37' de longitud oeste y 19°02' y 20°02' de latitud norte, la ZMCM ocupa una posición estratégica que refuerza su papel como núcleo económico, político y cultural de México.

Figura 3.1

Localización de la ZMCM



La ZMCM presenta una estructura policéntrica, con densificación en zonas consolidadas y expansión periférica hacia corredores viales y áreas de urbanización reciente. Además del Centro Histórico y el corredor Reforma-Polanco, destacan subcentros como Santa Fe, Insurgentes Sur-Perisur y Naucalpan-Tlalnepantla. Este patrón configura un tejido no uniforme en densidades, usos de suelo y condiciones del hábitat, consistente con la caracterización de metrópolis multinucleares y con periferias expandidas documentada para Ciudad de México (Aguilar, 2002).

Aspectos físicos y geográficos

La ZMCM se localiza en la región de Lagos y Volcanes de Anáhuac, dentro de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico Transversal, el cual atraviesa la República Mexicana de este a oeste. Este eje es uno de los sistemas montañosos más relevantes de México y constituye una barrera natural que divide América del Norte de América Central.

A pesar de que el relieve predominante en la ZMCM es la llanura, que cubre aproximadamente el 35% de su superficie, esta se encuentra rodeada de importantes elevaciones de origen

volcánico que enmarcan el valle. Al norte, se encuentra la Sierra de Guadalupe; al poniente, la Sierra de las Cruces; al sur, la Sierra Chichinautzin; al suroeste, el volcán Ajusco; y al oriente, la Sierra Nevada. En el interior del valle también se observan estructuras volcánicas aisladas, como la Sierra de Santa Catarina, al igual que formaciones como el Peñón del Marqués, el Peñón de los Baños y el Cerro de la Estrella, que contribuyen a la variada topografía de la región.

Históricamente, el Valle de México drenaba hacia el sur hasta que la actividad volcánica interrumpió el flujo natural de las corrientes de agua. Las erupciones volcánicas, particularmente en la Sierra de Chichinautzin, bloquearon el drenaje externo del valle, lo que provocó la acumulación de agua y la formación de los antiguos lagos de Zumpango, Texcoco, Xochimilco y Tláhuac (CONAGUA, 2015).

El subsuelo de la ZMCM está compuesto por materiales volcánicos como lavas, tobas y cenizas, junto con sedimentos granulares que en el pasado fueron transportados por ríos y arroyos desde las áreas montañosas hacia el valle. Encima de estos depósitos, se encuentran capas de arcillas y arenas finas, sedimentos provenientes de los antiguos lagos que ocupaban la zona. Esta mezcla de materiales define las características geológicas y geotécnicas de la región, lo cual influye tanto en la construcción de infraestructura como en la estabilidad del terreno en el área metropolitana (CONAGUA, 2015).

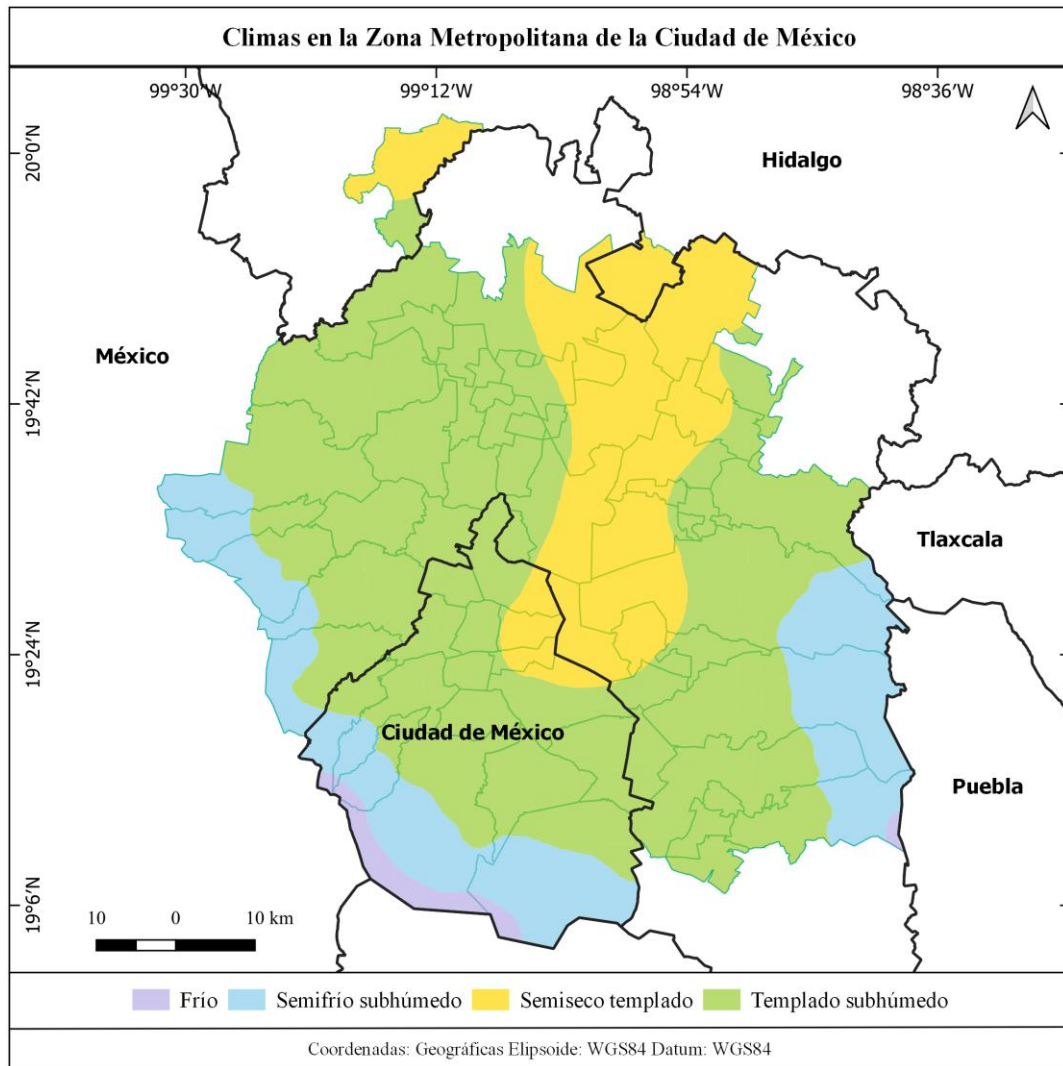
Características climáticas

Debido a su posición latitudinal dentro del territorio, la ZMCM se caracteriza por un paisaje rodeado de una importante cadena montañosa y de volcanes principalmente al sur, este y oeste. Su elevación de entre 1,799 y 5,381 m s. n. m. (CEM 3.0) y las características orográficas le confieren en la mayor parte de su extensión un clima templado subhúmedo y semiseco templado y en las cadenas montañosas un clima semifrío húmedo y subhúmedo (Figura 3.2).

Esta zona presenta dos temporadas claramente definidas. La primera es la temporada de verano, que abarca de junio a octubre, durante la cual se producen lluvias y el clima es cálido. Esto se debe a la influencia de masas de aire tropical, generalmente húmedo, que provienen del Océano Pacífico, el Mar Caribe y el Golfo de México. En contraste, la segunda temporada es la invernal, caracterizada por condiciones secas y temperaturas más frías. Esta época se distingue por tener una humedad relativa baja y la presencia de aire polar que desciende desde el norte del continente americano. Dentro de la temporada seca, se pueden identificar dos subdivisiones: la Seca-Caliente, que ocurre de marzo a mayo y se caracteriza por la presencia de aire tropical seco y temperaturas elevadas; y la Seca-Fría, que abarca de noviembre a febrero, marcada por aire polar de bajo contenido de humedad y temperaturas más frías (INEGI, 2005).

Figura 3.2

Climatología de la ZMCM



Contexto social y demográfico

La ZMCM es una de las mayores concentraciones poblacionales tanto en América Latina como a nivel mundial. Según el Censo de Población y Vivienda de 2020 realizado por el INEGI, la región alberga a 21.8 millones de personas, de las cuales el 51.7% son mujeres y el 48.3% son hombres. La población se concentra en su mayoría en los rangos de edad de 15 a 29 años, siendo los grupos de 25 a 29, 20 a 24, y 15 a 19 años los más numerosos, representando en conjunto un 24% del total de habitantes.

Si bien la población consiste en su mayoría de personas jóvenes, según el Consejo Nacional de Población (2024) la ZMCM se encuentra en un proceso de envejecimiento acelerado en comparación con el promedio nacional. Actualmente, el 14.6% de sus habitantes tiene 60 años

o más, mientras que el 15.2% son menores de 12 años. Se estima que para el 2025, la población de adultos mayores superará a la población infantil, lo que plantea retos significativos en la planificación urbana y los servicios básicos.

A pesar de que la ZMCM presenta un crecimiento demográfico lento (0.8% anual) y se proyecta una disminución en su volumen poblacional para 2035, la diferencia entre el consumo de agua y la disponibilidad de esta ya es una crisis que afecta la vida de miles de habitantes. Según el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), el consumo promedio diario por persona es de 380 litros, mientras que la dotación de agua potable promedio en las 16 alcaldías de la Ciudad de México es de apenas 150 litros por persona.

La configuración policéntrica, combinada con la expansión periférica, coexiste con procesos de segregación socioespacial entre núcleo, suburbios interiores y periferias. La evidencia muestra contrastes en acceso a agua entubada, drenaje y electricidad, así como en calidad de la vivienda y hacinamiento (porcentaje de viviendas con alta ocupación por cuarto); a ello se superponen niveles de pobreza (moderada y extrema), escolaridad, situación laboral y costos/tiempos de movilidad, configurando desventajas acumuladas en periferias y suburbios interiores (Pérez Campuzano, 2011; Aguilar y López, 2016).

La expansión sobre zonas periurbanas y de transición rural-urbana se asocia con fragmentación territorial y con cambios en controladores físico-territoriales del crecimiento (elevación, densidad previa, distancia a vías y al suelo urbano existente), lo que incrementa la impermeabilización, eleva los picos de escurrimiento y presiona la capacidad del drenaje pluvial. A escala de ciudad, se ha documentado que la superficie urbana reciente ha crecido más rápido que la población, indicador de expansión extensiva con implicaciones hídricas y de movilidad (Cruz-Bello et al., 2023).

Este panorama refleja un contexto social y demográfico que ejerce una presión constante sobre los recursos hídricos. La creciente urbanización y la densidad poblacional, sumadas a una gestión histórica que alteró la hidrología natural de la región, han generado condiciones críticas de disponibilidad y acceso al agua. Estos retos se analizan en detalle en la siguiente sección, donde se profundiza en la problemática hídrica actual que enfrenta la ZMCM.

3.2 Problemática hídrica y vulnerabilidad de la ZMCM

La ZMCM se encuentra sobre lo que originalmente fue una vasta red de lagos interconectados, rica en recursos hídricos. Sin embargo, la extensa urbanización y los proyectos de drenaje iniciados desde el período colonial transformaron drásticamente el entorno natural, llevando a la desecación de los lagos y a la modificación del equilibrio hidrológico. Estos cambios, combinados con un crecimiento poblacional acelerado y una expansión urbana incontrolada durante el último siglo, han provocado una sobreexplotación de acuíferos y un estrés hídrico persistente.

Históricamente, el suministro de agua de la ZMCM ha dependido en gran medida de la extracción de agua subterránea y la importación de agua de fuentes distantes, como los sistemas Cutzamala y Lerma (25%), ríos y manantiales (3%) y recursos hídricos subterráneos (72%) (Palma Nava et al., 2022). En siglos pasados, los manantiales y corrientes superficiales eran abundantes y proporcionaban una fuente confiable de agua dulce. Sin embargo, para 1930, la sobreexplotación de los acuíferos y el drenado artificial del valle habían reducido drásticamente estos recursos.

El drenaje extensivo y la explotación del agua subterránea, iniciados en la época colonial y acelerados durante el siglo XX, han provocado un descenso alarmante en el nivel piezométrico de los acuíferos. Actualmente, casi todos los manantiales originales de la región se han secado,

y las corrientes que bajan de las montañas son cortas e intermitentes, limitando severamente el uso de agua superficial como fuente de abastecimiento.

De acuerdo con Palma et al. (2022) a principios de la década de 1990, la Ciudad de México y sus zonas suburbanas, incluyendo zonas del Estado de México, abarcaban una superficie de 622 km². En ese entonces se estimaba la recarga natural de agua subterránea en 35 m³/s. Para 2019, la extensión territorial de la metrópoli había crecido hasta 1829 km², mientras que la recarga había disminuido a solo 23 m³/s, reflejando el impacto combinado de la urbanización, la impermeabilización del suelo y la sobreexplotación de recursos.

Los problemas relacionados con el agua de la zona no se limitan solo a la disponibilidad, sino a su distribución. Aun con coberturas altas de infraestructura, la continuidad diaria del servicio revela deficiencias. En la Ciudad de México, 98.9% de las viviendas reporta agua entubada, pero la proporción de hogares con suministro diario es sensiblemente menor: 70.3% en la CDMX y 48.4% en el Estado de México, de acuerdo con estimaciones por la RHA XIII Aguas del Valle de México.

La frecuencia del suministro expresa con claridad la desigualdad. Con base en la Encuesta Nacional de Ingreso y Gasto de los Hogares (ENIGH) 2022, uno de cada tres hogares con tubería recibe agua por tandeo. La brecha por estrato socioeconómico es marcada: a nivel nacional, 49.5% de los hogares de estrato bajo reporta tandeo frente a 17% en el estrato alto; en la Ciudad de México, la diferencia alcanza 75.5 puntos porcentuales (80.0% vs. 4.5%) (BBVA Research, 2024).

En las Figuras 3.3 y 3.4, se puede observar que los municipios con mayor porcentaje de viviendas sin acceso a agua entubada se encuentran en el estado de México. En particular, las Áreas Geoestadísticas Básicas Urbanas (AGEB) con menor acceso al agua entubada se encuentran en la periferia del núcleo económico de la ZMCM.

Esta distribución desigual refleja la brecha socioespacial de la ZMCM, donde las zonas más marginadas tienen a sufrir más la carencia de servicios básicos como el agua. Hernández (2015) señala que la falta de infraestructura en estos sectores no es solo una consecuencia de su ubicación geográfica, sino también del modelo de desarrollo urbano que ha priorizado la expansión sin garantizar el acceso a recursos esenciales.

En estas áreas, el suministro intermitente se suple con pipas públicas (solicitadas vía SACMEX/LOCATEL, sujetas a programación) o con pipas privadas, cuyo costo promedio en la CDMX se ubica alrededor de \$1,802.94 por 10 000 L ($\approx$ \$180/m³), con variaciones por zona y demanda. Esta modalidad introduce costos económicos y de tiempo adicionales para los hogares, reforzando la desventaja en sectores con mayor incidencia de tandeo (PROFECO, 2023; Gobierno de la CDMX/SACMEX, s. f.).

Figura 3.3

Viviendas sin agua entubada (%) por municipio, ZMCM

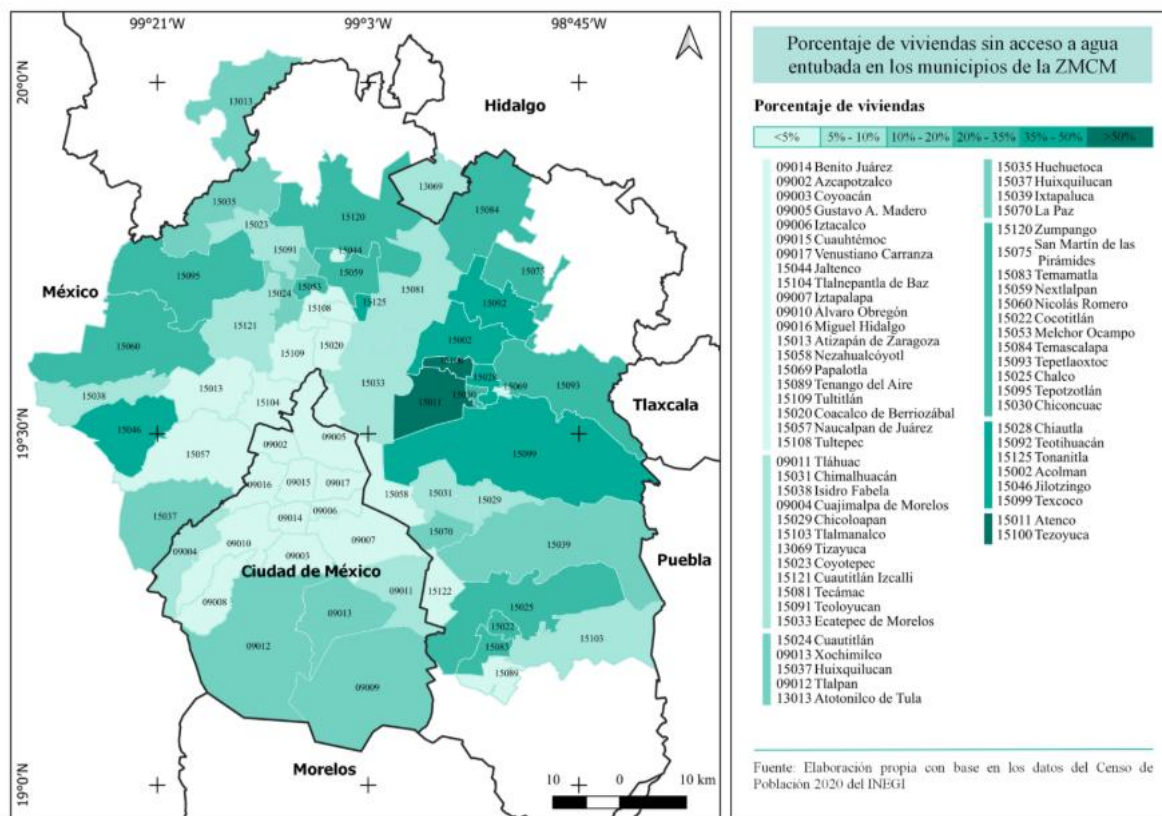
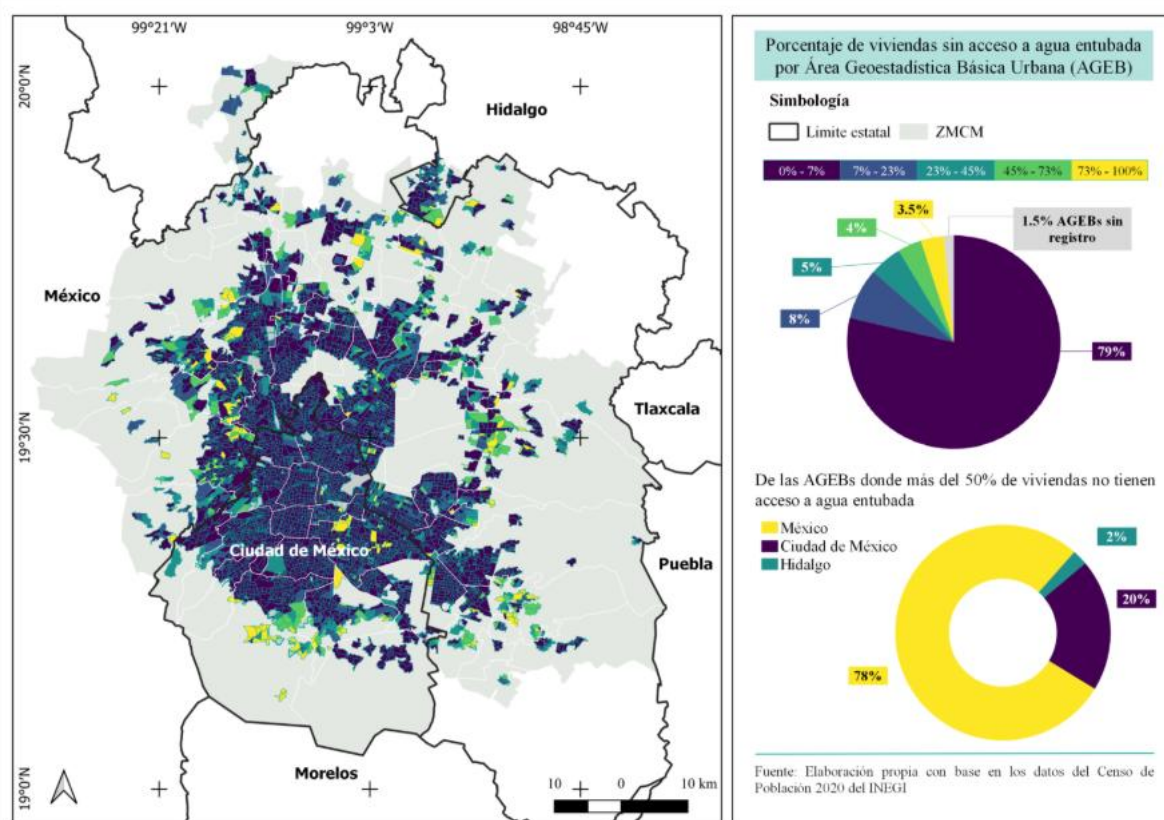


Figura 3.4

Viviendas sin agua entubada (%) por AGEB, ZMCM



Para los habitantes de estas zonas, la falta de acceso continuo al agua potable tiene múltiples implicaciones. En primer lugar, representa un obstáculo para el mantenimiento de condiciones adecuadas de higiene y saneamiento, incrementando la exposición a enfermedades gastrointestinales y dermatológicas. Por otra parte, el costo del agua para quienes dependen de fuentes alternativas suele ser mucho mayor que el de quienes reciben el servicio de manera regular a través de la red pública. Esta desigualdad económica refuerza los ciclos de pobreza, ya que los hogares deben destinar una parte significativa de su ingreso a la compra de un recurso que, en otras zonas de la ZMCM, es mucho más accesible.

A nivel social, la falta de acceso al agua en las zonas más marginadas no solo implica una carencia material, sino que también ha dado lugar a redes informales y mecanismos de intermediación que condicionan su distribución. Hernández (2015) describe cómo, en distintas áreas periféricas, el suministro de agua no siempre es gestionado directamente por las autoridades, sino que se encuentra en manos de actores locales que controlan su acceso,

estableciendo relaciones de dependencia e, incluso, generando conflictos dentro de las comunidades. En este contexto, el agua deja de ser solo un recurso esencial y se convierte en un factor que profundiza las desigualdades sociales, restringiendo las oportunidades de quienes ya enfrentan condiciones de vulnerabilidad.

Estos problemas dejan claro que la crisis hídrica en la ZMCM no puede reducirse únicamente a la escasez del recurso; también es un problema de distribución y acceso. La falta de infraestructura adecuada y la desigualdad en la provisión del agua no solo impactan en la vida cotidiana de miles de personas, sino que refuerzan otras formas de exclusión social. Quienes habitan en las zonas más desfavorecidas no solo enfrentan mayores dificultades para obtener agua, sino que también pagan más por ella y la reciben con menor calidad. En este contexto, la implementación de los SCALL surge como una estrategia de adaptación viable, especialmente en aquellas zonas donde la red de abastecimiento es insuficiente o ineficiente. Estos sistemas pueden reducir la dependencia de fuentes externas, disminuir costos para las familias y garantizar un suministro más constante, mejorando así la resiliencia de las comunidades más vulnerables ante la crisis hídrica de la metrópoli.

4. PROPUESTA METODOLÓGICA

4.1 Edificaciones en la ZMCM y su potencial de captación

El análisis del potencial de captación de agua de lluvia en entornos urbanos parte del principio físico de que toda superficie expuesta a la precipitación se comporta como un receptor potencial de agua. En la ZMCM, los techos de las edificaciones constituyen uno de los elementos más extensos y homogéneos para este propósito. Debido a su geometría esencialmente plana y a su disposición elevada respecto al nivel del suelo, los techos facilitan la acumulación y canalización del agua pluvial, permitiendo su conducción hacia sistemas de almacenamiento o de aprovechamiento directo.

La lógica fundamental detrás de la captación radica en la relación directa entre la cantidad de lluvia registrada, expresada en milímetros, y la superficie sobre la que cae. Cuando se reporta una precipitación de 10 mm en un día, esto indica que cada metro cuadrado de superficie horizontal recibe un volumen equivalente a 10 litros de agua. Por ejemplo, en un techo de 10 metros cuadrados, una lluvia de 10 mm se traduce en una acumulación potencial de 100 litros durante ese evento. De esta manera, el cálculo del agua captada depende fundamentalmente de dos factores: la magnitud de la precipitación y la extensión del área de captación disponible.

Este principio, aunque sencillo, adquiere especial relevancia en la configuración urbana actual, donde la concentración de edificaciones genera grandes superficies impermeables que interrumpen la infiltración natural, pero habilitan el aprovechamiento controlado del agua pluvial. El diseño y disposición de las ciudades, al multiplicar las superficies techadas y canalizar los escurrimientos, ofrece la oportunidad de recolectar volúmenes significativos de agua, siempre que se cuente con la infraestructura adecuada para su aprovechamiento.

En este sentido, el análisis del potencial de captación en la ZMCM inicia con la identificación y cuantificación de la superficie total de techos en el territorio. Este enfoque permite establecer la base física sobre la cual se calcula el volumen de agua disponible para captación, y constituye el punto de partida indispensable para el dimensionamiento de los SCALL a nivel municipal y regional. Así, la caracterización detallada de las edificaciones y su área de techumbre representa el primer paso metodológico para evaluar la factibilidad y el impacto potencial de los SCALL en el contexto urbano.

4.2 Estimación del área de captación disponible

La estimación del área de captación disponible constituye un paso fundamental para cuantificar el potencial hídrico de los SCALL a escala municipal en la ZMCM. El proceso inicia con la determinación precisa de la superficie efectiva de techumbres, ya que la superficie total de cada municipio no representa de manera realista el área susceptible de captar agua pluvial; en su mayoría corresponde a vialidades, banquetas, áreas verdes u otros usos no captantes. Por tal motivo, se delimita la huella urbana de las edificaciones y construcciones que pueden aprovechar el agua de lluvia.

Actualmente, la disponibilidad de información geoespacial de alta resolución permite abordar esta tarea con mayor exactitud. En el presente estudio se utiliza el Open Buildings 2.5D Temporal Dataset (Google Research), accesible mediante Google Earth Engine. Esta base de datos proporciona series anuales de huellas de edificaciones para el periodo de los años 2016 al 2023, con una resolución espacial efectiva de aproximadamente 4 metros, lo que facilita la obtención de estimaciones precisas y actualizadas del área techada en la ZMCM.

Dado que el objetivo consiste en analizar el comportamiento futuro de la captación bajo escenarios de cambio climático, se requiere contar con estimaciones proyectadas de la superficie de techumbres al año 2040. Esto permite evaluar cómo la dinámica urbana, es decir,

el crecimiento o disminución de las edificaciones, influye en el potencial de captación pluvial en el mediano plazo. Para este propósito, se emplea una metodología de extrapolación lineal basada en los datos observados entre los años 2016 y 2022.

El proceso de extrapolación estima el valor de una variable fuera del rango de observación directa, bajo el supuesto de que la tendencia observada en el periodo analizado se mantiene en el futuro. En este caso, la variable de interés es la superficie total de techos (en m²) identificada en cada municipio. Para validar la metodología, se utiliza el periodo de los años 2016 al 2022 para construir el modelo de extrapolación y se compara el valor estimado para el año 2023 con el valor observado en ese mismo año. Esta comparación verifica que la tendencia es coherente y que el modelo reproduce adecuadamente el crecimiento o disminución de la superficie techada. Posteriormente, aplicando el mismo procedimiento, se proyecta la superficie de techos hacia el año 2040, valor que constituye la base para calcular el potencial de captación bajo distintos escenarios de precipitación futura.

Ecuación de extrapolación lineal

Para proyectar la superficie edificada de cada municipio en años futuros, se utiliza una extrapolación lineal basada en el ajuste de una recta por mínimos cuadrados ordinarios (OLS, por sus siglas en inglés). Esta metodología resulta apropiada cuando la serie de datos históricos muestra una tendencia regular, permitiendo estimar el nivel esperado y el cambio promedio anual a partir de las observaciones disponibles. Además, su transparencia y facilidad de implementación la convierten en una opción adecuada para estudios territoriales, siempre considerando la validez de extender la tendencia observada hacia periodos no muestreados.

El modelo adoptado para la estimación de la superficie edificada se expresa de la siguiente manera:

$$S_{i,t} = \beta_{0,i} + \beta_{1,i}t + \epsilon_{i,t}$$

donde:

- $S_{i,t}$: superficie edificada observada en el municipio i y año t (m^2)
- $\beta_{0,i}$: intercepto de la recta para el municipio i
- $\beta_{1,i}$: pendiente (incremento promedio anual) para el municipio i
- $\epsilon_{i,t}$: término de error o residuo

Se obtienen los parámetros del modelo mediante mínimos cuadrados ordinarios (OLS), utilizando la serie de datos históricos disponible para cada municipio. Las expresiones generales para su cálculo son:

$$\beta_{1,i} = \frac{\sum_t (t - \bar{t})(S_{i,t} - \bar{S}_i)}{\sum_t (t - \bar{t})^2}$$

$$\beta_{0,i} = \bar{S}_i - \beta_{1,i}\bar{t}$$

donde:

- $\bar{S}_i$: promedio de las superficies observadas
- $\bar{t}$: promedio de los años considerados

Una vez estimados los parámetros del modelo, se calcula la superficie edificada proyectada para un año objetivo (t_0) mediante la expresión:

$$\hat{S}_{i,t_0} = \beta_{0,i} + \beta_{1,i}t_0$$

donde:

- t_0 : año para el cual se realiza la estimación
- $\hat{S}_{i,t_0}$: superficie edificada estimada en el municipio i para el año t_0

El ajuste de la recta y los valores proyectados se realiza para cada municipio, generando así una estimación diferenciada y más realista del potencial de captación en toda la ZMCM.

Ajuste por eficiencia y estimación del área de captación disponible

La superficie total de techos identificada representa el límite teórico máximo para la captación pluvial, sin embargo, en la práctica, este valor se ve reducido por diversas condiciones físicas y operativas. Entre los principales factores que influyen en la eficiencia real de recolección se encuentran el tipo de material de las cubiertas, la presencia de obstáculos y estructuras (como tinacos, antenas, anuncios o vegetación), el estado de limpieza y mantenimiento, la pendiente de los techos y la necesidad de descartar el escurrimiento inicial mediante dispositivos *first flush* para asegurar la calidad del agua recolectada.

Para reflejar de manera integral el impacto de estos factores, se adopta un coeficiente de eficiencia de captación (η) igual al 80%. Este valor representa la fracción de la superficie techada que puede aportar agua de lluvia de manera efectiva a lo largo del año, considerando en conjunto todas las pérdidas asociadas al proceso de captación urbano. Esta aproximación metodológica se respalda en experiencias y lineamientos técnicos tanto nacionales como internacionales. Por ejemplo, la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA) establece eficiencias típicas entre 75% y 85% para techos urbanos, integrando factores como materiales, mantenimiento y dispositivos de descarte inicial (SEDEMA, 2021). De forma complementaria, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2021) recomienda emplear coeficientes de eficiencia entre 80% y 90% para cubiertas lisas o de lámina, y de 60% a 80% para techos de concreto, valores plenamente concordantes con el adoptado en el presente estudio.

Para este estudio se aplicó un coeficiente de eficiencia del 80%, por lo tanto, se estima el área de captación disponible para cada municipio (A_{capt}) mediante la siguiente expresión:

$$A_{capt} = S_{techo} \times \eta$$

donde:

- A_{capt} : área de captación disponible (m^2)
- S_{techo} : superficie total de techos estimada (m^2), resultado de la proyección metodológica descrita
- η : eficiencia de captación (0.8), valor que engloba los principales factores constructivos y operativos en la ZMCM

La aplicación de este coeficiente permite obtener una aproximación metodológicamente robusta y realista del área funcional para la implementación de SCALL en el ámbito urbano, ajustando el potencial teórico a las condiciones reales de operación y diseño.

4.3 Selección de escenarios climáticos

Se utilizan datos de proyección de los años 2021 al 2040 del CMIP6 con enfoque en la variable de precipitación mensual a una resolución espacial de 30 segundos de arco (~ 1 km). Respecto a los GCM seleccionados, se emplean:

- ACCESS-CM2
- HadGEM3-GC31-LL
- MRI-ESM2-0

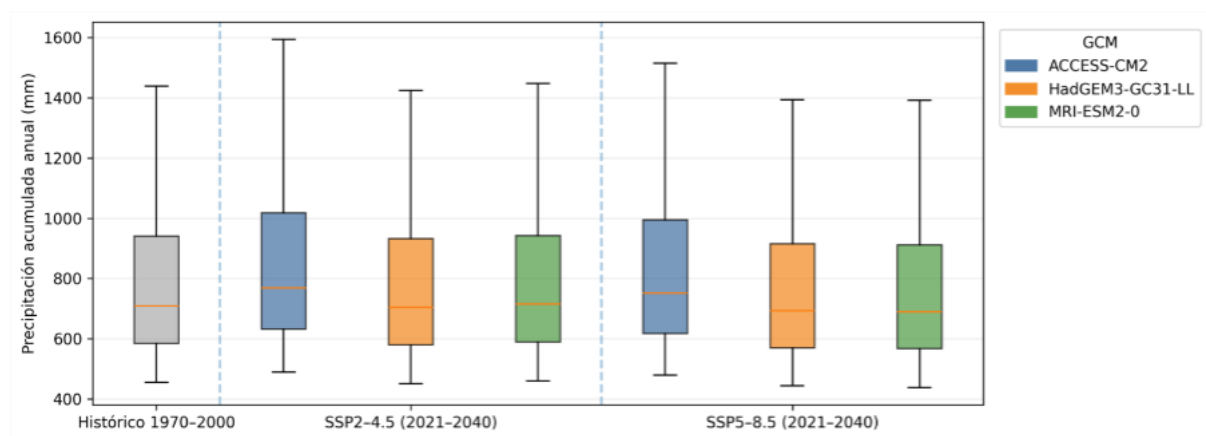
La elección de estos modelos se basa tanto en su disponibilidad en WorldClim como en su uso y desempeño en la región del centro de México, documentado en estudios recientes como el de Cruz-González et al. (2025), que evalúa proyecciones de temperatura y precipitación en una zona fisiográficamente similar a la ZMCM. Estos modelos han demostrado una capacidad adecuada para reproducir las condiciones climáticas regionales, y su inclusión busca garantizar una representación más robusta y confiable de la variabilidad climática futura. Aunque el estudio referido emplea ACCESS-ESM1-5, aquí se utiliza ACCESS-CM2 por su disponibilidad en WorldClim y por pertenecer a la misma familia ACCESS, con documentación técnica equivalente.

En total, se generan seis simulaciones combinando los tres modelos mencionados con los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5, todas proyectadas para el horizonte cercano (2021 - 2040). Estas simulaciones se comparan con un periodo histórico base (1970 - 2000) para identificar cambios relevantes en los patrones de precipitación (Figura 4.1).

Posteriormente, se seleccionan dos de las seis trayectorias, aquellas que presenten diferencias significativas entre sí, para representar un posible escenario más favorable y otro más desfavorable en términos de captación pluvial. Este paso busca realizar un análisis más enfocado sobre la viabilidad de los SCALL bajo contextos climáticos contrastantes y generar recomendaciones informadas para su implementación.

Figura 4.1

Variaciones en la precipitación proyectada en el área de estudio



4.4 Análisis de los SCALL con base en disponibilidad de precipitación

El análisis de viabilidad de los SCALL constituye un paso esencial para determinar el alcance real de estas soluciones como estrategia de abastecimiento hídrico en la ZMCM. La viabilidad se entiende aquí como la capacidad potencial de los SCALL para cubrir las necesidades básicas de agua de la población en distintos municipios, considerando tanto las condiciones actuales como los posibles escenarios futuros de cambio climático y desarrollo urbano.

La metodología parte de la premisa de que la disponibilidad de agua de lluvia apta para aprovechamiento depende fundamentalmente de tres factores: la superficie de captación disponible, la precipitación anual que recibe esa superficie y la cantidad de personas que dependen de este recurso en cada territorio. Para integrar estos elementos, se calcula la disponibilidad potencial de agua pluvial por persona y por día, lo que permite comparar el potencial de los SCALL frente a estándares internacionales de suficiencia hídrica.

El procedimiento consiste en estimar, para cada municipio y escenario, el volumen anual de agua que podría recolectarse en las techumbres identificadas (ya ajustadas por eficiencia de captación). Este volumen se obtiene multiplicando el área útil de captación por la precipitación anual proyectada, considerando que la conversión de milímetros de lluvia a litros de agua es directa (1 mm de lluvia en 1 m² equivale a 1 litro de agua). Posteriormente, el volumen anual potencial se distribuye entre la población proyectada en ese mismo horizonte temporal, y se normaliza a una dotación diaria per cápita, facilitando así la comparación con criterios de suficiencia.

Para evaluar la viabilidad, se utilizan referencias internacionales que sugieren una dotación mínima de 100 litros por persona al día para cubrir necesidades básicas de consumo e higiene (World Health Organization, 2003). Cuando la disponibilidad estimada supera o iguala este umbral, se considera que los SCALL, bajo las condiciones planteadas, pueden funcionar como una alternativa robusta de abastecimiento para la población local. En contraste, si la dotación potencial es menor, se identifica la necesidad de complementar los sistemas de captación con otras fuentes o estrategias de gestión hídrica.

El análisis se realiza para diferentes escenarios climáticos y demográficos, permitiendo observar cómo la variabilidad en la precipitación futura y el crecimiento de la infraestructura urbana y la población afectan la suficiencia de los SCALL. Esta comparación entre escenarios

altos y bajos de precipitación, así como entre distintos municipios, permite identificar zonas de mayor y menor factibilidad para el aprovechamiento pluvial y anticipar los retos que podrían surgir ante escenarios adversos de cambio climático.

Cabe señalar que este enfoque permite no solo cuantificar el potencial teórico, sino también visualizar espacialmente la viabilidad de los SCALL en mapas o categorías territoriales, lo que facilita la identificación de áreas prioritarias para intervención, diseño de políticas públicas o estrategias de adaptación. Además, la metodología reconoce las incertidumbres asociadas a las proyecciones de precipitación, a la evolución de la superficie de captación y a los cambios poblacionales, por lo que sus resultados deben interpretarse como aproximaciones comparativas útiles para la planeación, más que como pronósticos absolutos.

4.5 Evaluación cualitativa de vulnerabilidad hídrica en la ZMCM

La integración de las variables analizadas (superficie de captación disponible, precipitación proyectada y dinámica poblacional) permite realizar una evaluación cualitativa de la vulnerabilidad hídrica a nivel municipal en la ZMCM. Este enfoque facilita identificar, de manera anticipada, los municipios con mayor o menor potencial para alcanzar niveles de autosuficiencia hídrica mediante los SCALL bajo distintos escenarios futuros.

Se reconoce que la disponibilidad de agua captada no depende únicamente de la cantidad de lluvia, sino también de cómo se distribuyen y evolucionan la infraestructura urbana y la población en cada territorio. Al combinar estas dimensiones, se genera un diagnóstico comparativo que resalta las diferencias territoriales en la capacidad de adaptación hídrica frente al cambio climático y el crecimiento urbano.

Esta evaluación cualitativa se apoya en la interpretación conjunta de los resultados obtenidos para cada escenario, permitiendo clasificar municipios según su nivel de vulnerabilidad y anticipar las zonas donde los SCALL podrían representar una solución robusta, o donde, por el

contrario, resulten insuficientes sin medidas complementarias. Así, el análisis cualitativo no solo señala los municipios con mayor o menor potencial, sino que también revela la sensibilidad del sistema ante variaciones en precipitación, aumento de la población o expansión de la infraestructura.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

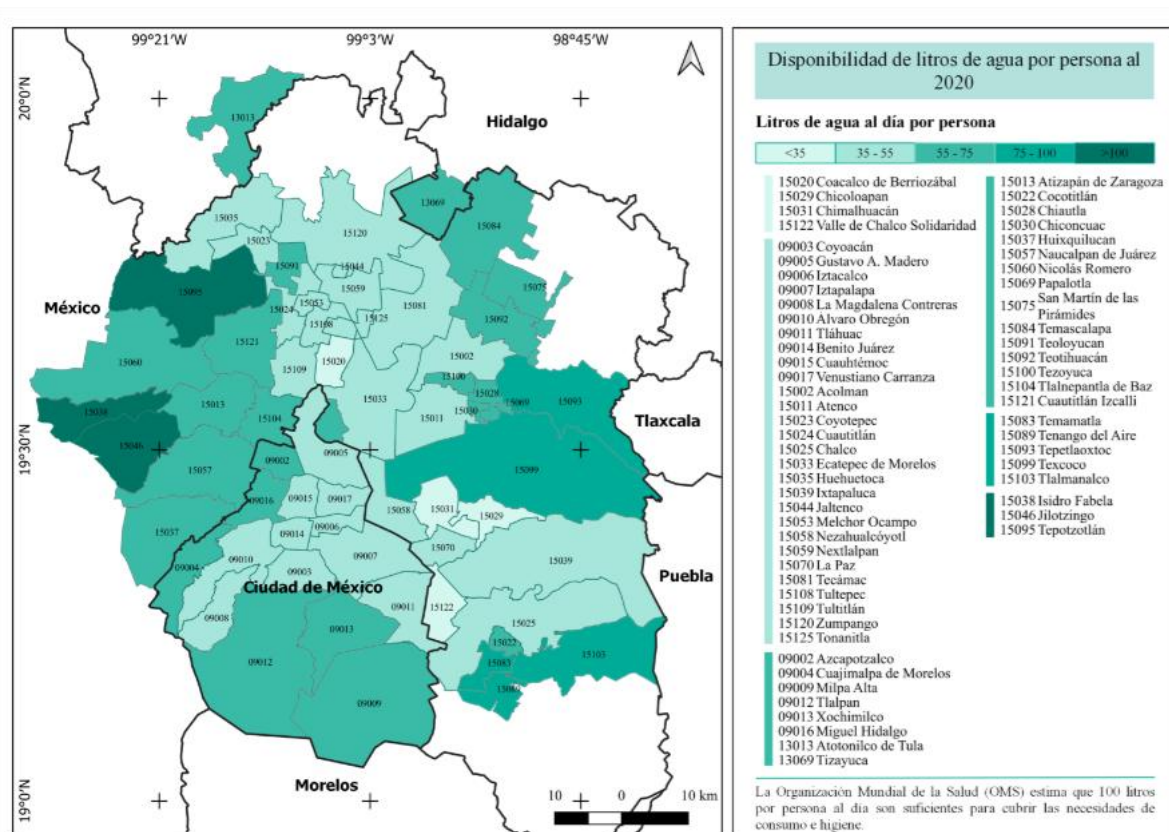
5.1 Línea base de captación de agua de lluvia al 2020

Se establece una línea base de precipitación independiente del cambio climático para estimar la disponibilidad diaria de agua de lluvia por persona a partir de la huella de edificios existente al año 2020. Esta línea base ofrece una referencia territorial clara de hasta dónde podría contribuir la captación pluvial bajo condiciones actuales de ocupación urbana, sin introducir variaciones climáticas.

El mapa (Figura 5.1) permite identificar zonas con mayor potencial relativo y áreas donde la captación, por sí sola, difícilmente cubriría las necesidades de la población, sugiriendo la implementación de medidas complementarias.

Figura 5.1

Disponibilidad per cápita de agua de lluvia con precipitación histórica 1970–2000, huella de techos 2020 y población 2020 en la ZMCM

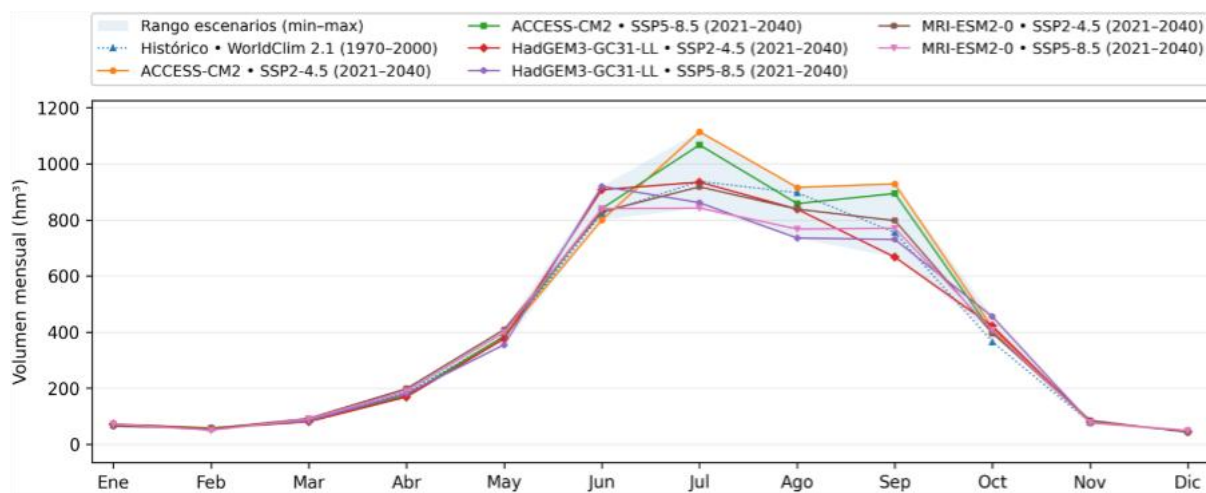


5.2 Proyecciones de precipitación futura en la ZMCM

Se analizan los escenarios generados producto de combinar los 3 modelos seleccionados, ACCESS-CM2, MRI-ESM2-0 y HadGEM3.GC31-LL con las SSP 2-4.5 y 5-85 (Figura 5.2). Se observa que, de los 6 escenarios, el modelo ACCESS-CM2 bajo SSP2-4.5 presenta la mayor acumulación anual total de precipitación, con aproximadamente 6.25 millones de litros. En contraste, el modelo MRI-ESM2-0 bajo SSP5-8.5 muestra la menor acumulación, con cerca de 5.62 millones de litros. Esto representa una diferencia de aproximadamente 637500 litros, equivalente a una diferencia de 11.35% entre el escenario más húmedo y el más seco.

Figura 5.2

Distribución mensual de la precipitación acumulada en los escenarios

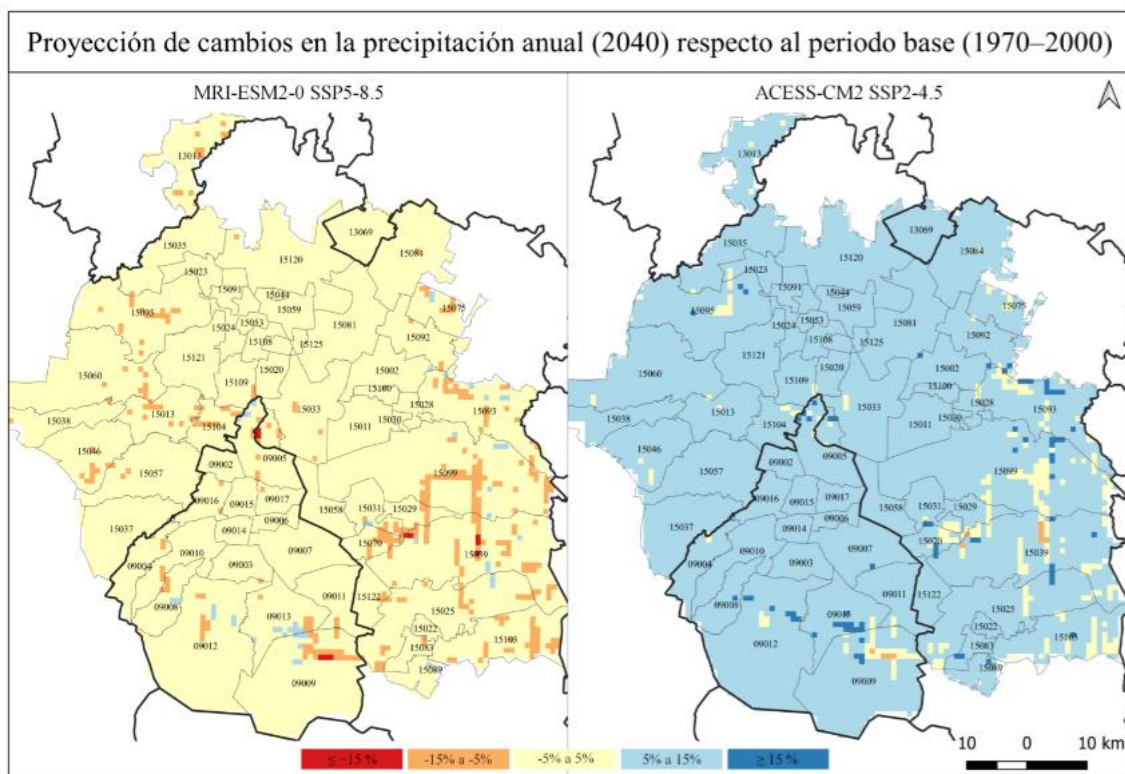


Nota. Los totales corresponden a la suma espacial anual sobre la ZMCM

Respecto a los 2 escenarios contrastantes seleccionados, se presenta el cambio porcentual de la precipitación anual respecto al periodo base (1970-2000) en la Figura 5.3. En ACCESS-CM2 SSP2-4.5 predominan incrementos leves a moderados (+5 % a +15 %) sobre la mayor parte de la ZMCM, con focos ≥ 15 % en el sur y oriente. En MRI-ESM2-0 SSP5-8.5 se observan disminuciones ligeras a moderadas (−15 % a −5 %) concentradas en el oriente y suroriente, mientras que los aumentos se restringen a manchas aisladas. En ambos casos se observa que las zonas con tendencia a la disminución de precipitación se concentran en el suroriente.

Figura 5.3

Comparación espacial de los escenarios bajo y alto para 2040 en la ZMCM



En cuanto a la variabilidad intraanual, se observa consistencia con los patrones de temporada seca y de lluvias de la región. En ambos escenarios, los volúmenes son reducidos de enero a marzo y aumentan con rapidez desde abril. ACCESS-CM2 SSP2-4.5 alcanza el máximo en julio y mantiene valores elevados en agosto y septiembre. MRI-ESM2-0 SSP5-8.5 presenta un pico más moderado en junio y julio y disminución en agosto y septiembre. La diferencia máxima entre escenarios se observa en julio, mientras que en los meses secos las series convergen.

5.3 Potencial de captación de agua de lluvia en edificaciones

Para estimar el potencial de captación en la ZMCM se integra la precipitación proyectada para los dos escenarios seleccionados con la huella edificada estimada para 2040 y la población proyectada al mismo horizonte. La conversión de precipitación a volumen se aplica sobre techumbres y considera una eficiencia global del 80 % (coeficiente que engloba rugosidad del material, pérdidas por primer flujo, conducción y almacenamiento). El volumen anual

disponible se normaliza por población y se expresa como litros por persona al día ($\text{L hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$), de modo que el mapa comunica directamente la capacidad potencial de los SCALL para cubrir necesidades domésticas. A efectos de interpretación, la Organización Mundial de la Salud (OMS) sugiere 100 L por persona al día como umbral de suficiencia básica para consumo e higiene.

En el escenario bajo (MRI-ESM2-0 SSP5-8.5) la distribución se desplaza respecto del escenario alto, con menor disponibilidad concentrada en el centro, consistente con la mayor concentración poblacional, y en el suroriente de la ZMCM. El nororiente mantiene clases medias-altas ($75\text{--}100 \text{ L hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$), mientras que en el poniente y surponiente persisten áreas con $\geq 75 \text{ L hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$. En conjunto, disminuye la superficie en $\geq 75 \text{ L hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$ y aumentan las clases $< 55 \text{ L hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$ principalmente fuera del poniente, lo que implica mayores requerimientos de almacenamiento y medidas complementarias en el centro y suroriente (Figura 4).

En el escenario alto (ACCESS-CM2 SSP2-4.5) se observan valores superiores de disponibilidad relativa en varios municipios del poniente, así como en zonas con baja densidad y alta proporción de superficie techada respecto de su población. Destacan manchas $> 100 \text{ L hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$, que sugieren capacidad para cubrir, al menos estacionalmente, las necesidades básicas por vivienda cuando los sistemas operan con la eficiencia supuesta. Hacia el oriente se observan gradientes a la baja, aunque persisten corredores de $55\text{--}75$ y $75\text{--}100 \text{ L hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$ asociados a núcleos con menor densidad o a techumbres extensas (Figura 5.5).

Figura 5.4

Potencial de captación en edificaciones en la ZMCM bajo MRI-ESM2-0 SSP5-8.5 (horizonte 2040), expresado en litros por persona al día.

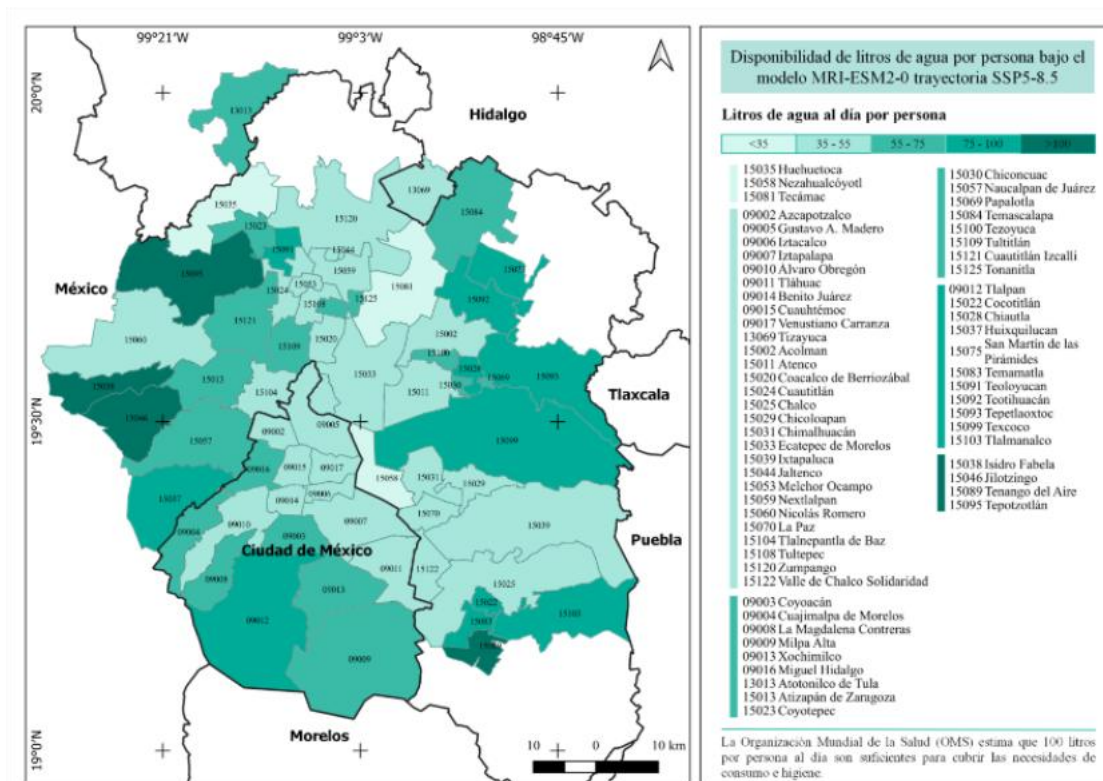
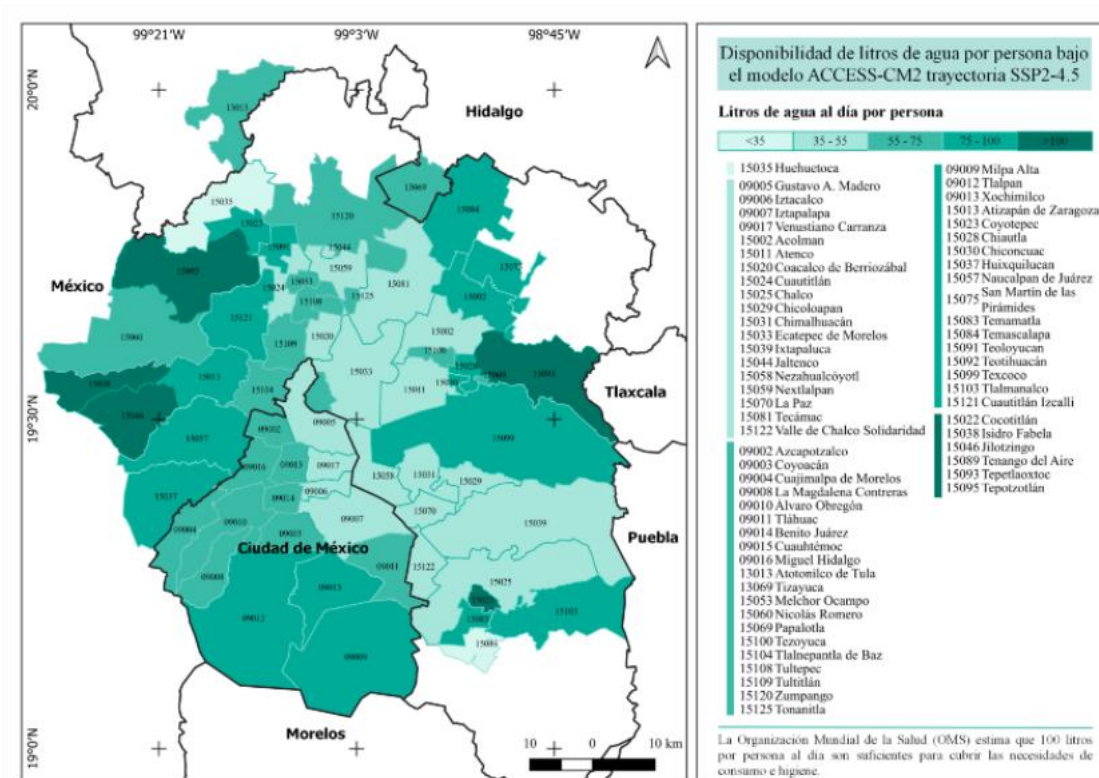


Figura 5.5

Potencial de captación en edificaciones en la ZMCM bajo ACCESS-CM2 SSP2-4.5 (horizonte 2040), expresado en litros por persona al día.



5.4 Impacto del cambio climático en el análisis de los SCALL

Los resultados muestran que el cambio climático modifica el volumen anual disponible para los SCALL en la ZMCM. El rango entre el escenario alto (ACCESS-CM2 SSP2-4.5) y el escenario bajo (MIRI-ESM2-0 SSP5-8.5) alcanza una diferencia de 11.35% en la suma anual, suficiente para alterar el dimensionamiento de almacenamiento y las metas de cobertura per cápita.

La comparación mensual con la serie histórica confirma un patrón estacional similar, ascenso desde abril y máximos verano, pero con intensidades distintas. ACCESS incrementa los picos en julio y septiembre, mientras que MRI los atenúa. Estas variaciones sugieren que, aun manteniéndose los patrones de precipitación estacionales, la capacidad de captación difiere entre escenarios, condicionando el volumen que se requiere almacenar para transitar los meses de precipitación menor.

En conjunto, los patrones estacionales descritos se traducen en diferencias operativas entre escenarios: con ACCESS-CM2 SSP2-4.5 la recarga concentra mayores volúmenes en verano y habilita márgenes más amplios para sostener la demanda hacia el final del año; con MRI-ESM2-0 SSP5-8.5 la atenuación de los picos reduce esa holgura y eleva la probabilidad de agotar el almacenamiento antes del inicio de la siguiente temporada lluviosa. Así, la planificación de los SCALL no depende solo del total anual, sino del calendario efectivo de aportaciones y de la relación entre entradas y salidas a lo largo del año.

En términos espaciales, bajo el escenario alto se amplía la presencia de intervalos de disponibilidad per cápita en 55-75 y 75-100 L hab⁻¹ d⁻¹ en el poniente y sur poniente, mientras que en el escenario bajo aumenta la proporción de áreas con menos de 55 L hab⁻¹ d⁻¹ en el centro y suroriente. El nororiente mantiene valores intermedios a altos y los valores por encima de 100 L hab⁻¹ d⁻¹ quedan restringidos a zonas puntuales en ambos supuestos. Estas variaciones reflejan tanto las diferencias en precipitación entre escenarios, como la relación entre superficie techada y población: donde esta relación es favorable, la disponibilidad se sostiene en 55-100 L hab⁻¹ d⁻¹, en el caso contrario, los descensos de precipitación desplazan la disponibilidad por debajo de los 55 L hab⁻¹ d⁻¹.

El umbral de 100 L hab⁻¹ d⁻¹ funciona como criterio territorial: delimita áreas con factibilidad de cubrir necesidades básicas mediante SCALL y áreas donde se requieren medidas complementarias. Bajo ACCESS se amplía el conjunto de zonas que rebasan el referente; bajo MRI dicho conjunto se reduce y se dispersa.

La interpretación anterior está sujeta a incertidumbre por la variabilidad entre modelos y trayectorias, los supuestos de extrapolación de superficie techada y de proyección demográfica, y la eficiencia global adoptada. Esto no invalida la comparación entre escenarios, pero sí invita

a una lectura prudente y a acompañar las decisiones con análisis de sensibilidad en los parámetros más influyentes.

En la sección de anexos se adjunta la tabla que resume la población al 2020, la población proyectada al 2040, la huella de los techos para ambas fechas y el potencial de captación en litros por persona al día según los datos históricos y los escenarios contrastantes analizados previamente. De dicha tabla se extraen las observaciones que se enlistan a continuación:

- 1) En el escenario bajo, solo los municipios Isidro Fabela, Jilotzingo, Tenango del Aire y Tepetzotlán alcanzan el umbral de $100 \text{ L hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$, cuya población conjunta representa el 0.7% de la población proyectada. En el caso del escenario alto, a estos municipios se suman Cocotitlán y Tepetlaoxtoc, aumentando la cobertura a 1% de la población.
- 2) Comparando con la línea base al 2020, en ambos casos se observa que se incorporan municipios al umbral de $100 \text{ L hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$, 1 en el escenario bajo y 3 en el escenario alto. Para estos casos se cree que la causa se debe al incremento de la infraestructura, es decir, la proyección de aumento de huella de techos con posibilidad de captación pluvial.
- 3) En el escenario alto, 9 municipios se encuentran a $\pm 10 \text{ L}$ del umbral; 2 están apenas por arriba (Cocotitlán y Tepetlaoxtoc) y 9 por abajo (San Martín de las Pirámides, Chiautla, Texcoco, Tlalmanalco, Teotihuacán, Teoloyucan, y Temamatla). En el escenario bajo, solo los municipios de Cocotitlán y Tepetlaoxtoc se acercan al umbral por abajo. Estos resultados indican oportunidad de medidas de bajo costo (mejoras de eficiencia/almacenamiento) para consolidar o lograr los $100 \text{ L} \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$.
- 4) En cuanto a la robustez de los resultados, 4 municipios exhiben factibilidad ($\geq 100 \text{ L} \cdot \text{hab}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$) y 57 deficiencia en ambos modelos; en 2 municipios los modelos difieren, por lo que la inferencia es incierta. En términos poblacionales, ello representa

0.7% de la población 2040 con factibilidad robusta, 99% con deficiencia robusta y 0.2% en situación incierta. Los casos inciertos se ubican típicamente en torno al umbral (márgenes pequeños), por lo que conviene tratarlos con cautela y priorizarlos para intervenciones de bajo costo que aseguren o permitan alcanzar la dotación.

En suma, el contraste entre escenarios muestra que el cambio climático afecta cuánto se puede captar, cuándo conviene almacenar y dónde priorizar la intervención.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones principales

Este estudio muestra que el cambio climático modifica el volumen anual disponible para SCALL en la ZMCM y su distribución temporal. El contraste entre el escenario alto (ACCESS-CM2 SSP2-4.5) y el escenario bajo (MRI-ESM2-0 SSP5-8.5) alcanza 11.35 % en la suma anual, con una estacionalidad similar a la histórica, ascenso desde abril y máximos en verano, pero de distinta magnitud: ACCESS intensifica los picos y MRI los atenúa, lo que condiciona el volumen de almacenamiento necesario para transitar los meses secos.

Espacialmente, la disponibilidad per cápita es heterogénea: bajo el escenario alto aumenta la presencia de 55–100 L hab⁻¹ d⁻¹ en poniente y surponiente; bajo el escenario bajo crecen las áreas con menos de 55 L hab⁻¹ d⁻¹ en centro y suroriente, mientras el nororiente mantiene valores intermedios a altos. El umbral de 100 L hab⁻¹ d⁻¹ permite distinguir áreas con mayor factibilidad de cubrir necesidades básicas mediante SCALL de aquellas donde se requieren medidas complementarias.

Estas conclusiones deben leerse con prudencia por la variabilidad entre modelos y trayectorias, los supuestos de extrapolación de superficie techada y de proyección demográfica, y la eficiencia global adoptada; aun así, respaldan que el diseño y la priorización territorial de SCALL incorporen explícitamente los escenarios de cambio climático.

6.2 Recomendaciones para la integración de SCALL en políticas de adaptación

Se recomienda adoptar el escenario bajo (MRI-ESM2-0 SSP5-8.5) como referencia conservadora de diseño para dimensionar almacenamiento y fijar metas de cobertura. Considerando esto, el dimensionamiento debe responder al déficit esperado entre el final de la

temporada de lluvias y el inicio de la siguiente, y validar en campo la eficiencia global asumida. En zonas que se mantienen en 75–100 L hab⁻¹ d⁻¹ bajo ambos escenarios conviene maximizar área captadora y asegurar la operación con pérdidas mínimas, mientras que en zonas por debajo de 55 L hab⁻¹ d⁻¹ la implantación de SCALL debe acompañarse de gestión de la demanda, reúso local y almacenamiento comunitario para mejorar la continuidad del servicio.

La priorización territorial puede anclarse en el umbral de 100 L hab⁻¹ d⁻¹ como criterio práctico. En áreas que rebasan ese referente con consistencia estacional, los esfuerzos deben orientarse a la consolidación de sistemas domésticos y en equipamientos públicos con metas de sustitución parcial de agua de la red. En áreas de 55–75 L hab⁻¹ d⁻¹, los programas deben combinar expansión de superficie captadora, mejoras operativas y esquemas de almacenamiento compartido a escala barrial. Donde la disponibilidad proyectada es menor a 55 L hab⁻¹ d⁻¹, la política debe integrar SCALL con medidas complementarias (ahorro, reúso, abastecimiento alterno) y priorizar intervenciones que reduzcan vulnerabilidad social más que metas de autosuficiencia hídrica.

Para reducir incertidumbre y acelerar la adopción, se propone una ruta de proyectos demostrativos con monitoreo y evaluación. Estos proyectos deben instalarse en sitios representativos (escuelas, centros de salud, mercados, edificios administrativos), con objetivos de servicio explícitos y un protocolo de seguimiento durante 12–24 meses que mida volumen captado y consumido, continuidad, sustitución de agua de la red, incidencias operativas, costos por metro cúbico efectivo y, cuando el uso lo exija, indicadores básicos de calidad del agua. Los resultados deben alimentar fichas técnicas y manuales de diseño y operación, estandarizando parámetros y presupuestos para su escalamiento.

La operación adaptativa requiere un calendario alineado con la estacionalidad observada. Es recomendable programar mantenimiento preventivo de techumbres, canaletas y filtros antes

del ascenso de abril; verificar capacidades hidráulicas para caudales pico a inicios del verano; ajustar el volumen de primer flujo con la primera lluvia significativa; y establecer umbrales operativos de nivel que activen medidas de ahorro conforme avanza la estación seca. Estas acciones deben vincularse a procedimientos claros de inspección, registro y corrección que mantengan la eficiencia cercana a la supuesta en los cálculos.

Finalmente, la efectividad de una política de SCALL depende también de componentes sociales. Se recomienda implementar programas de información y educación ciudadana que expliquen qué puede esperarse en cada temporada y qué acciones tomar en el hogar y a escala barrial, así como mecanismos de acompañamiento para operación y mantenimiento. En paralelo, conviene institucionalizar la actualización periódica de las estimaciones con nuevas corridas climáticas y datos observados de desempeño, e incorporar análisis de sensibilidad para los parámetros clave (eficiencia, crecimiento de superficie techada y población). Con estas medidas, la integración de SCALL puede responder de forma coherente a las diferencias temporales y territoriales identificadas en este estudio y sostener su utilidad como instrumento de adaptación.

REFERENCIAS

- Agarwal, A., & Narain, S. (1997). Dying wisdom: Rise, fall and potential of India's traditional water harvesting systems. Centre for Science and Environment.
- Aguilar, A. G. (2002). Las mega-ciudades y las periferias expandidas. EURE (Santiago), 28(85), 121–149. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612002008500007>
- Aguilar, A. G., & López, F. M. (2016). Espacios de pobreza en la periferia urbana y suburbios interiores de la Ciudad de México: Las desventajas acumuladas. EURE (Santiago), 42(125), 5–29. <https://www.eure.cl/index.php/eure/article/view/1566>
- ANA. (2020). Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. <https://www.gov.br/ana/pt-br>
- Andrade-Velázquez, M., & Montero-Martínez, M. J. (2023). Statistical downscaling of precipitation in the south and southeast of Mexico. Climate, 11(9), 186. <https://doi.org/10.3390/cli11090186>
- Australian Government. (2015). National Construction Code, Building Code of Australia. <https://www.abcb.gov.au/>
- BBVA Research. (2024, 23 de abril). Agua ya no pasa por mi casa: Una revisión de la situación hídrica actual (con base en ENIGH 2022).
- Brown, R., Keath, N., & Wong, T. (2016). Urban water management in cities: Historical, current and future regimes. Water Science & Technology, 59(5), 847–855.
- Brown, R. R., Keath, N., & Wong, T. H. F. (2016). Urban water management in cities: Historical, current and future regimes. Water Sensitive Urban Design (WSUD). [Referencia incompleta, verificar fuente]

- Cavazos, T., Salinas, J. A., & Díaz-Esteban, L. (2013). Downscaling dinámico y estadístico para la región de México: Comparación de métodos. *Boletín de la Sociedad Meteorológica Mexicana*, 31(1), 45–58.
- Centre for Science and Environment (CSE). (2019). Rainwater harvesting: Traditional and modern techniques. <https://www.cseindia.org/>
- Climateurope. (2020). Climate change and uncertainty: Communicating risk to stakeholders. Climateurope Project.
- CONAGUA. (2015). NOM-011-CONAGUA-2015. Conservación del recurso agua: Especificaciones y método para la determinación del volumen de agua en obras de almacenamiento. Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2020). Estadísticas del agua en México. Edición 2020. <https://www.gob.mx/conagua>
- CONAGUA. (2021). Estadísticas del agua en México. Edición 2021. <https://www.gob.mx/conagua>
- Conde, C., & Gay, C. (2008). Impactos potenciales del cambio climático en México. UNAM, Centro de Ciencias de la Atmósfera.
- Conde, C., Ferrer, R., & Gay, C. (2011). Escenarios regionales de cambio climático en México. *Atmósfera*, 24(1), 125–140.
- Cordero, G. (2012). El cambio climático. *Ciencia y Sociedad*, 37, 227. <https://doi.org/10.22206/cys.2012.v37i2.pp227-240>

- Cruz-Bello, G. M., Galeana-Pizaña, J. M., & González-Arellano, S. (2023). Urban growth in peri-urban, rural and urban areas: Mexico City. *Buildings & Cities*, 4(1), 1–16. <https://doi.org/10.5334/bc.230>
- Cruz-González, A., Arteaga-Ramírez, R., Soria-Ruiz, J., Sánchez-Cohen, I., Monterroso-Rivas, A. I., & Quevedo-Nolasco, A. (2025). Climate change projections in temperature and precipitation using CMIP6 in Central Mexico. *Theoretical and Applied Climatology*, 156(2). <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05345-3>
- Cruz-González, L., Montero-Martínez, M., Barrios-Peña, C., & Pineda-Martínez, L. (2025). Evaluación de modelos de circulación general para proyecciones de temperatura y precipitación en el centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Atmosféricas*, 41(1), 35–52.
- Domínguez, A. (2022). Potencial de captación pluvial en espacios urbanos subutilizados: Estudio de caso en Iztapalapa. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 23(2), 123–135.
- Domínguez, A., & Hernández, M. (2020). Percepción social sobre el uso de agua de lluvia en la Ciudad de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(2), 381–394.
- El Financiero. (2024, 30 de enero). Agua por tandeo en CDMX: ¿Cómo saber a qué hora habrá suministro de líquido en tu colonia? <https://www.elfinanciero.com.mx/cdmx/2024/01/30/agua-por-tandeo-en-cdmx-como-saber-a-que-hora-habra-suministro-de-liquido-en-tu-colonia/>

- European Commission. (2018). Nature-based solutions: State of the art in EU-funded projects. Publications Office of the European Union. <https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation>
- European Commission. (2018). Urban water management and green infrastructure in Germany. [Referencia incompleta, verificar fuente]
- FAO. (2021). Manual para la cosecha de agua de lluvia en América Latina y el Caribe. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/3/cb4583es/cb4583es.pdf>
- Figueiredo, F., Ribeiro, A., & Silva, D. (2017). Rainwater harvesting systems in rural Brazil: A case study. *Water*, 9(2), 105.
- Figueiredo, R., Ribeiro, L., & Silva, J. (2017). Água de Chuva para Consumo Humano: Experiências no Brasil. [Referencia incompleta, verificar fuente]
- Gaceta Oficial de la Ciudad de México. (2019). Decreto por el que se reforma la Ley del Derecho al Acceso, Disposición y Saneamiento del Agua de la Ciudad de México. <https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/>
- García, C., & Solís, E. (2020). Impacto social de los sistemas de captación de agua de lluvia en zonas vulnerables de la Ciudad de México. *Gestión y Política Pública*, 29(2), 371–400.
- García, C., Solís, E., & Torres, R. (2021). Evaluación de la eficiencia de techos urbanos para la captación de agua de lluvia. *Ingeniería Hidráulica en México*, 36(4), 65–76.
- García, M., & Solís, R. (2020). Participación comunitaria en la gestión de agua de lluvia en la Ciudad de México. [Referencia incompleta, verificar fuente]

- Giorgi, F. (2019). Regional climate modeling: Status and perspectives. *Journal of Computational Physics*, 9(1), 18–33.
- Giorgi, F., & Mearns, L. O. (1999). Introduction to special section: Regional climate modeling revisited. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D6), 6335–6352. <https://doi.org/10.1029/98JD02072>
- Gobierno de la Ciudad de México / SACMEX. (s. f.). Abastecimiento emergente de agua potable (trámite para solicitud de pipas). <https://www.cdmx.gob.mx/public/InformacionTramite.xhtml?idTramite=178>
- Gould, J., & Nissen-Petersen, E. (1999). Rainwater catchment systems for domestic supply: Design, construction and implementation. Intermediate Technology Publications.
- Hernández Hernández, M. (2015). Prácticas ciudadanas e institucionales en la gestión de agua potable y saneamiento en dos regiones hidropolitanas de México y Brasil (Tesis doctoral, CIESAS). <http://ciesas.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1015/1695>
- Hodge, A. T. (2002). *Roman Aqueducts & Water Supply*. Duckworth.
- Hodge, T. (2002). Roman aqueducts and water supply. [Referencia incompleta, verificar fuente]
- IHWRM. (2018). Integrated water resources management guidelines. International Hydrological Programme, UNESCO.
- INECC-SEMARNAT. (2018). Vulnerabilidad al cambio climático en México: Proyecciones de impacto regional. Ciudad de México.

- INEGI. (2005). Estadísticas del medio ambiente del Distrito Federal y zona metropolitana 2002.
https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825480509/702825480509_7.pdf
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2022). Evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático en México. SEMARNAT-INECC.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2022). Informe nacional de cambio climático: Vulnerabilidad de México ante el cambio climático. SEMARNAT-INECC.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). Climate change 2013: The physical science basis (T. F. Stocker et al., Eds.). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate change 2021: The physical science basis (V. Masson-Delmotte et al., Eds.). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Knutti, R., & Sedláček, J. (2012). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*, 3(4), 369–385.
<https://doi.org/10.1038/nclimate1716>
- López-Espinoza, E. D., Herrera-Moro, D. R., Gómez-Ramos, O., Zavala-Hidalgo, J., Novelo Casanova, D. A., & Fuentes-Mariles, O. A. (2022). Atlas del comportamiento de la precipitación para la ZMVM: Reporte descriptivo.

- Lutz, W., Mutarak, R., & Striessnig, E. (2016). Demographic and human capital scenarios for the 21st century: 2015 assessment for 201 countries. Publications Office of the European Union.
- Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A. M., Chandler, R. E., Kendon, E. J., Widmann, M., ... & Bienen, S. (2010). Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, 48(3), RG3003.
- Martí Ezpeleta, A., Lorenzo González, N., Royé, D., & Díaz Poso, A. (Eds.). (2022). Retos del cambio climático: Impactos, mitigación y adaptación. Asociación Española de Climatología; Agencia Estatal de Meteorología.
- Martínez-Austria, P. F., & Patiño-Gómez, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(1), 5–20.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222012000100001
- Martínez Fernández, J., Fernández Bremauntz, A., & Osnaya, P. (2006). Cambio climático: Una visión desde México. INE-SEMARNAT.
- Martínez, J., López, L., & Hernández, F. (2023). Propuesta de lineamientos técnicos para la regulación de sistemas de captación pluvial en México. *Ingeniería Agua*, 27(1), 33–45.
- Martínez, J., López, M., & Hernández, R. (2023). Propuesta de Norma Oficial Mexicana para la captación pluvial. [Referencia incompleta, verificar fuente]
- McGuffie, K., & Henderson-Sellers, A. (2014). The climate modelling primer (4th ed.). Wiley-Blackwell.

- Mesgari, E., Hosseini, S. A., Sadat, H. M., Houshyar, M., & Partoo, L. G. (2022). Assessment of CMIP6 models' performances and projection of precipitation based on SSP scenarios over the MENAP region. *Journal of Water and Climate Change*, 13, 10. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.195>
- Met Office. (2018). Understanding Representative Concentration Pathways (RCPs). UK Met Office.
- MLIT (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan). (2019). Rainwater utilization in Japan. <https://www.mlit.go.jp/>
- N+. (2025, 16 de septiembre). Lluvias y granizo en CDMX: Corrientes de agua bajan sobre la carretera Picacho-Ajusco (video). <https://www.nmas.com.mx/ciudad-de-mexico/lluvias-y-granizo-hoy-en-cdmx-alcaldias-tienen-doble-alerta-por-aguacero-16-de-septiembre/>
- ONU-Hábitat. (s. f.). Superficie de CDMX crece a ritmo tres veces superior al de su población. <https://onu-habitat.org/index.php/superficie-de-cdmx-crece-a-ritmo-tres-veces-superior-al-de-su-poblacion>
- Pacey, A., & Cullis, A. (1986). Rainwater harvesting: The collection of rainfall and runoff in rural areas. Intermediate Technology Publications.
- Palma Nava, A., Parker, T. K., & Carmona Paredes, R. B. (2022). Challenges and experiences of managed aquifer recharge in the Mexico City Metropolitan Area. *Groundwater*, 60(5), 675–684. <https://doi.org/10.1111/gwat.13237>
- Palma, A., Rivera, A., & Carmona, R. (2022). A unified hydrogeological conceptual model of the Mexico Basin Aquifer after a century of groundwater exploitation. *Water*, 14(10), 1584. <https://doi.org/10.3390/w14101584>

- Pérez Campuzano, E. (2011). Diferenciación socioespacial en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Investigaciones Geográficas*, (74), 7–27. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112011000100008
- PROFECO. (2023, noviembre). Quién es quién en los precios: Pipas de agua potable. Resultados del monitoreo (octubre 2023). https://www.profeco.gob.mx/precios/canasta/pipas/2023/QQPPIPAS_110323.pdf
- Proceso. (2024, 1 de febrero). Son ya 284 las colonias que reciben agua por tandeo en la CDMX. <https://www.proceso.com.mx/nacional/cdmx/2024/2/1/son-ya-284-las-colonias-que-reciben-agua-por-tandeo-en-la-cdmx-323232.html>
- Queensland Government. (2007). Rainwater harvesting and use guidelines. Department of Natural Resources and Water. <https://www.qld.gov.au/>
- Queensland Government. (2007). Waterwise in Queensland: Rainwater tanks. [Referencia incompleta, verificar fuente]
- Randall, D. A., Wood, R. A., Bony, S., Colman, R., Fichefet, T., Fyfe, J., ... & Shukla, J. (2007). Climate models and their evaluation. En S. Solomon et al. (Eds.), *Climate change 2007: The physical science basis* (pp. 589–662). Cambridge University Press.
- Rogelj, J., Shindell, D., Jiang, K., Fifita, S., Forster, P., Ginzburg, V., ... & Vilarino, M. V. (2019). Mitigation pathways compatible with 1.5 °C in the context of sustainable development. En *Global warming of 1.5 °C: An IPCC Special Report*.
- SACMEX. (2023). Lineamientos técnicos para la instalación y operación de sistemas de captación de agua de lluvia en la Ciudad de México. Sistema de Aguas de la Ciudad de México.

- Sánchez, E., Cea, C., & Cavazos, T. (2020). Proyecciones regionales del cambio climático en México: Escenarios y modelación climática. *Climate Dynamics*, 54(2), 501–521.
- Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil de la Ciudad de México (SGIRPC CDMX). (2025, 9 de septiembre). Se activa alerta amarilla por lluvias fuertes (Comunicado 250909).
- SEDEMA. (2021). Guía para la instalación y operación de sistemas de captación de agua de lluvia en viviendas unifamiliares. Secretaría del Medio Ambiente, Ciudad de México. <https://data.sedema.cdmx.gob.mx/cosechadelluvia/guia-de-instalacion-2021.pdf>
- SEDEMA. (2022). Cosecha de lluvia: Manual para la instalación de sistemas de captación. Secretaría del Medio Ambiente, Ciudad de México. <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/>
- SEDEMA. (2024). Informe de resultados: Cosecha de Lluvia 2019–2024. Secretaría del Medio Ambiente, Ciudad de México.
- SEMARNAT. (2021). Programa Nacional Hídrico 2020–2024. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- TWDB (Texas Water Development Board). (2011). Texas manual on rainwater harvesting (3rd ed.). <https://www.twdb.texas.gov/>
- UN-Habitat. (2018). Guidelines for rainwater harvesting in urban areas. United Nations Human Settlements Programme. <https://unhabitat.org>
- UNAM. (2019). Guía de buenas prácticas para la captación de agua de lluvia. Universidad Nacional Autónoma de México.

- UNESCO. (2004). Shibam: The oldest skyscraper city in the world.
<https://whc.unesco.org/en/list/192/>
- World Health Organization (WHO). (2003). Domestic water quantity, service level and health. World Health Organization.
https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/wsh0204chap3.pdf

GLOSARIO DE TÉRMINOS

ACCESS-CM2: Modelo climático global utilizado en proyecciones CMIP6

AGEB: Área Geoestadística Básica

ANA: Agência Nacional de Águas (Brasil)

CH₄: Metano

CMIP6: Proyecto de Intercomparación de Modelos de Clima Acoplados, sexta fase

CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

CO₂: Dióxido de carbono

CONAGUA: Comisión Nacional del Agua

CONAPO: Consejo Nacional de Población

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

GCM: Modelos de Circulación General (General Circulation Models)

GEI: Gases de Efecto Invernadero

HadGEM3-GC31-LL: Modelo climático global utilizado en proyecciones CMIP6

HDPE: Polietileno de alta densidad

INECC: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

IPCC: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

LAN: Ley de Aguas Nacionales

MRI-ESM2-0: Modelo climático global utilizado en proyecciones CMIP6

NOM: Norma Oficial Mexicana

OLS: Mínimos Cuadrados Ordinarios (Ordinary Least Squares)

OMS: Organización Mundial de la Salud

PVC: Cloruro de polivinilo

PRECIS: Providing Regional Climates for Impacts Studies

RCP: Trayectorias de Concentración Representativa (Representative Concentration Pathways)

RCM: Modelos Climáticos Regionales (Regional Climate Models)

SACMEX: Sistema de Aguas de la Ciudad de México

SCALL: Sistemas de Captación de Agua de Lluvia

SEDATU: Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano

SEDEMA: Secretaría del Medio Ambiente

SSP: Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (Shared Socioeconomic Pathways)

TWDB: Texas Water Development Board

WSUD: Water Sensitive Urban Design

WRF: Weather Research and Forecasting Model

ZMCM: Zona Metropolitana de la Ciudad de México

ANEXOS

CVEGEO	NOM ENT	NOM MUN	Población		Superficie de techos m ²		Disponibilidad de litros al día por persona		
			2020	2040	2020	2040	2020	MRI-ESM2-0 SSP5-8.5	ACCESS-CM2 SSP2-4.5
09002	Ciudad de México	Azcapotzalco	439115	449623	13695216	14553246,9	60,42413	52,710978	59,060873
09003	Ciudad de México	Coyoacán	621774	538574	16408160	19082796	52,15687	58,488465	65,315123
09004	Ciudad de México	Cuajimalpa de Morelos	221323	237349	5765424	7108474,3	65,4917	64,229275	71,472295
09005	Ciudad de México	Gustavo A. Madero	1187205	1027004	29191456	30940948	40,64588	42,217054	47,221535
09006	Ciudad de México	Iztacalco	410164	362412	10070624	11573324	41,52953	45,084095	50,343495
09007	Ciudad de México	Iztapalapa	1856787	1617140	42157904	49750908,6	37,6758	42,381141	47,282898
09008	Ciudad de México	La Magdalena Contreras	250655	230700	5324672	6262004,6	51,71198	56,379106	62,646812
09009	Ciudad de México	Milpa Alta	155354	169227	4746576	7266580	64,33485	74,856913	82,989059
09010	Ciudad de México	Alvaro Obregón	768303	768227	18037120	20433256	53,36382	51,272689	57,235029
09011	Ciudad de México	Tláhuac	398696	373824	11011520	15643011,4	43,10192	54,237265	60,45857
09012	Ciudad de México	Tlalpan	709261	708333	20063808	25761978,9	65,46963	75,511665	83,955314
09013	Ciudad de México	Xochimilco	448820	415098	13344208	18432202,3	55,37906	69,783165	77,612588
09014	Ciudad de México	Benito Juárez	440107	450350	11464176	13446669,7	51,66394	49,644401	55,560602
09015	Ciudad de México	Cuauhtémoc	552889	479080	14849648	16248339,4	49,93814	52,799719	59,079693
09016	Ciudad de México	Miguel Hidalgo	422392	388249	12751200	14317180	63,13283	65,055741	72,943099
09017	Ciudad de México	Vemustiano Carranza	449748	394233	10924448	12358374,9	40,47668	43,02153	48,05692
13013	Hidalgo	Atotonilco de Tula	64954	100379	3092656	5390972	65,94985	62,214107	69,723095
13069	Hidalgo	Tizayuca	173550	314043	8143136	13893818,9	62,57777	49,820895	55,33779
15002	México	Acolman	174654	233455	6115504	8590657,1	48,08175	41,887228	46,544215
15011	México	Atenco	77209	116496	2732256	4131884	49,90184	41,812968	46,530754
15013	México	Atizapán de Zaragoza	529602	491363	16407280	20732817,1	60,8096	69,75535	78,376327
15020	México	Coacalco de Berriozábal	297300	288959	6596656	8235694,3	34,7521	37,187122	41,53413
15022	México	Cocotitlán	15320	15864	822256	1005859,4	65,34044	93,06294	103,451244
15023	México	Coyotepec	41285	38649	1352416	2011786,3	53,06266	70,280518	78,84422
15024	México	Cuautitlán	182805	248001	5691216	8795553,1	51,04182	48,645993	54,510974
15025	México	Chalco	408243	559358	11805744	17709296	48,55382	44,523921	49,549182
15028	México	Chiautla	30440	29452	1494544	2230952	68,26938	88,518165	98,320746
15029	México	Chicoloapan	202812	162846	4245264	6233596	31,32547	47,533745	52,939387
15030	México	Chiconcuac	28142	30367	1364096	1877062,9	67,90123	73,126242	81,240645
15031	México	Chimalhuacán	714694	710250	15129968	23101426,9	31,17966	40,278837	44,889975
15033	México	Ecatepec de Morelos	1661966	1631730	46052592	54668734,3	41,20703	41,755976	46,53917
15035	México	Huahuatlaca	167457	369661	5283696	7592135,4	49,4619	27,150289	30,417074
15037	México	Huixquilucan	289243	317881	8452496	11388508,6	70,63132	75,479641	84,118314
15038	México	Isidro Fabela	12074	11104	553760	842622,9	113,19405	155,813204	174,58889
15039	México	Ixtapalapa	551268	624121	12628064	18265753,1	37,03843	40,581436	45,143759
15044	México	Jaltenco	28558	27807	724688	1034496,6	38,06945	46,778429	52,146408
15046	México	Jilotzingo	20148	20845	976176	1492013,7	121,95163	151,174344	168,712893
15053	México	Melchor Ocampo	62165	70205	1849488	2775207,4	47,18034	52,202878	58,421157
15057	México	Naucalpan de Juárez	843256	767871	24893152	29808173,7	64,92937	73,29407	82,194092
15058	México	Nezahualcóyotl	1091644	1078838	25776832	29458898,3	35,84139	34,334162	38,307724
15059	México	Nextlalpan	58991	101083	2029568	3238594,9	51,28155	39,812819	44,36287
15060	México	Nicolás Romero	436718	515070	11529600	15588880,6	56,06949	54,771618	61,564566
15069	México	Papalotla	4980	5547	245104	317403,4	69,35457	67,152153	74,514717
15070	México	La Paz	308152	303821	7744832	11215600	38,11505	47,617909	53,017451
15075	México	San Martín de las Pirámides	29652	33331	1648160	2732496,6	70,72125	89,436145	99,283516
15081	México	Tecámac	560481	806270	14902992	21993823,4	37,51364	31,766141	35,345345
15083	México	Temamatla	14360	17274	649568	980976,6	82,45447	84,877499	94,38244
15084	México	Temascalapa	44407	47264	2024480	3189504,6	58,27214	72,253421	80,181652
15089	México	Tenango del Aire	11421	6740	526592	716931,4	96,23261	187,54931	208,021845
15091	México	Teoloyucan	66133	60437	2552032	3837450,9	61,75105	84,446087	94,689098
15092	México	Teotihuacán	59255	61342	3100304	4816156,6	68,71527	85,756485	95,34874
15093	México	Tepetitlán	33044	35987	1906128	2856690,3	84,62226	97,780222	108,474409
15095	México	Tepotzotlán	105466	121637	6794080	13458810,3	113,71347	168,195623	189,042026
15099	México	Texcoco	283079	327106	14345280	22140518,9	76,35468	86,273202	95,754996
15100	México	Tezoyuca	47940	68873	2064320	3695830,3	58,52091	61,896374	68,855081
15103	México	Tlalmanalco	49861	49700	1796672	2274090,9	81,26909	85,93287	95,481531
15104	México	Tlalnepantla de Baz	678095	748675	22642512	26096320,6	60,67687	51,472221	57,689544
15108	México	Tultepec	159884	166583	4069952	6427538,9	40,70622	51,172424	57,223844
15109	México	Tultitlán	521908	477532	15870800	20519062,3	50,32671	59,385783	66,477172
15120	México	Zumpango	289465	398335	10047424	17364019,4	49,94804	53,105959	59,136526
15121	México	Cuautitlán Izcalli	562904	577031	21704304	28602057,7	67,26038	73,235042	82,16632
15122	México	Calle de Chalco Solidaridad	395880	324641	9001024	12120420,6	34,11396	46,336174	51,697923
15125	México	Tonanilitla	15437	19938	469200	897580,6	43,72355	55,740536	62,020821