



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIÓN EN
INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN DE
AGUA DE LLUVIA EN LA ACADEMIA MEXICANA
DE CIENCIAS

TESINA

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA

PRESENTA:

ING. GERARDO SÁMANO ROMERO

DIRECTORA DE TESIS

DRA. ALMA CONCEPCIÓN CHÁVEZ MEJÍA

CIUDAD DE MÉXICO, 2017

Índice

TABLAS	IV
FIGURAS	IV
MAPAS.....	IV
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
I. A. INTRODUCCIÓN.....	5
I. B. PROBLEMA DE APLICACIÓN.....	9
I. C. HIPÓTESIS	9
I. D. OBJETIVO	10
II. MARCO TEÓRICO	11
II. A. ANTECEDENTES.....	11
II. A . i. Área de estudio.....	11
II. B. DISPONIBILIDAD DE AGUA EN MÉXICO.....	19
II. B . i. Disponibilidad de agua y fuentes de abastecimiento de agua potable	19
II. B . ii. Agua en el Valle de México	21
II. B . iii. Agua en la delegación Tlalpan.....	22
II. B . iv. Cantidad de agua y salud	23
II. C. SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA	25
II. C . i. Definición	25
II. C . ii. Reseña histórica	26
II. C . iii. Componentes de un Sistema de Captación de Agua de Lluvia	27
II. C . iv. Entorno de aplicación.....	30
II. D. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	31
III. METODOLOGÍA.....	33
III. A. RECOLECCIÓN DE DATOS.....	33
III. B. DETERMINACIÓN DE OFERTA Y DEMANDA DE AGUA.....	37
III. C. DETERMINACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DEL SISTEMA.....	38
IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	41
IV. A. OFERTA Y DEMANDA DE AGUA	41
IV. B. CONFIABILIDAD DEL SISTEMA	43
IV. C. PLAN DE CAPTACIÓN	46
IV. D. COMPARACIÓN DE COSTOS	48
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	49
REFERENCIAS.....	51
ANEXO 1	55

TABLAS

TABLA 1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS DELEGACIONES DE LA CIUDAD DE MÉXICO	13
TABLA 2 INSTALACIONES DE LA AMC Y SU MANERA DE ABASTECIMIENTO	18
TABLA 3 FUENTES DE AGUA DEL VALLE DE MÉXICO	21
TABLA 4 CANTIDAD DE AGUA DOMICILIARIA, NIVEL DE SERVICIO, ACCESO, NECESIDADES ATENDIDAS E IMPACTOS EN LA SALUD.....	24

FIGURAS

FIGURA 1 COMPONENTES DEL CICLO HIDROLÓGICO MEXICANO (VALORES MEDIOS ANUALES)	19
FIGURA 2 ACCESO AL AGUA EN MÉXICO POR TIPO DE FUENTE	20
FIGURA 3 ACCESO AL AGUA EN LA DELEGACIÓN TLALPAN POR TIPO DE FUENTE	22
FIGURA 4 ESQUEMA DE LOS COMPONENTES DE UN SCALL.....	27
FIGURA 5 ELEMENTOS DE UN SCALL PRESENTES EN EL AUDITORIO GALILEO GALILEI DE LA AMC.....	34
FIGURA 6 DETERMINACIÓN DEL ÁREA ÚTIL DE CAPTACIÓN DEL AUDITORIO GALILEO GALILEI.....	35
FIGURA 7 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL EN LA ESTACIÓN 09002 AJUSCO	36
FIGURA 8 ANÁLISIS DE LOS VOLÚMENES OFERTADOS Y DEMANDADOS DE MANERA ANUAL, MENSUAL Y DIARIA.....	42
FIGURA 9 COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ANUAL DE LOS VOLÚMENES ALMACENADOS Y SUSTRÁIDOS DEL TANQUE	44
FIGURA 10 COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS VOLÚMENES ALMACENADOS Y SUSTRÁIDOS DEL TANQUE DE ENERO A ABRIL	45
FIGURA 11 COMPORTAMIENTO DEL AGUA COSECHADA Y ALMACENADA DEL TANQUE COMPARADA CON LA DEMANDA DE ACUERDO CON EL PLAN DE CAPTACIÓN	47

MAPAS

MAPA 1 VALLE DE MÉXICO	12
MAPA 2 UBICACIÓN DE LA DELEGACIÓN TLALPAN.....	14
MAPA 3 CLIMAS DOMINANTES EN LA DELEGACIÓN TLALPAN.....	15
MAPA 4 UBICACIÓN DE LA AMC Y ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS	17

I. Planteamiento del problema

I. A. Introducción

En el año 2015 se identificó a la crisis hídrica como el riesgo mundial de mayor importancia, calificación otorgada basada en su posible impacto a la sociedad (Foro Económico Mundial, 2015), la misma fuente considera que el riesgo para el cual la región latinoamericana está menos preparada es la profunda desigualdad social y que existe además una relación inherente entre estos dos conceptos; crisis hídrica y desigualdad social. La labor que como generación hemos de realizar es la de lograr una mejor distribución del agua asegurando su calidad y cantidad de manera sustentable y con un mayor alcance a las zonas que no cuentan con un sistema de distribución o en donde el mismo es deficiente.

El estado mexicano reconoció formalmente el derecho humano al agua en el 2012 al reformar el párrafo seis del artículo 4° de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos el cual establece que "Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines".

En términos generales el país presenta altos índices de acceso al agua y saneamiento, en efecto al 2015 se registró una cobertura nacional de agua potable del 94.35 por ciento y 92.82 en alcantarillado (INEGI, 2016), en el caso de la Ciudad de México la cobertura en abastecimiento fue de 98.58%, la cuarta más alta del país, sin embargo, esta cifra no establece con claridad si las personas tienen un acceso al agua que cumpla con ser suficiente, salubre, aceptable y asequible¹.

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) el término cobertura de agua potable incluye a las personas que tienen agua entubada dentro de su vivienda; fuera de la vivienda pero dentro del terreno, de una llave pública, o bien de otra vivienda. No obstante esta definición no contempla la calidad o periodicidad del servicio. Datos del Censo de Población y Vivienda 2010 muestran que del total de viviendas con agua entubada a nivel nacional (25 360 800) sólo poco más del 73% cuenta con este servicio diariamente, en la Ciudad de México las cifras establecían que aproximadamente el 20% de la población no podía acceder al agua de manera continua (INEGI, 2010).

La falta de agua genera problemas que impactan en múltiples aspectos de la vida diaria; provoca problemas de salud en las personas, dificulta las labores domésticas y la tarea de hacerse con ella requiere de gran cantidad de trabajo familiar. La persistencia de rezagos en el servicio de abastecimiento de agua potable y saneamiento obedece en gran parte a las dificultades que existen al trabajar en terrenos montañosos y a los elevados costos de las obras de infraestructura en esos lugares (SEDESOL, 2014), si a esto le añadimos un ordenamiento urbano poco planeado y la existencia de asentamientos irregulares este problema tiende a acentuarse en lugares como la Ciudad de México y su Zona Metropolitana.

El abastecimiento de agua en la Ciudad de México se distingue por la baja disponibilidad de agua natural y las extracciones de agua superiores a los niveles de recarga, esto aunado a una población periférica en constante crecimiento genera una alta presión sobre los recursos hídricos existentes (Banco Mundial, 2013). La situación empeora debido a que la ciudad se ve afectada por inundaciones recurrentes debido a sus patrones de lluvia y al hecho de que se ubica dentro de una cuenca cerrada.

Un reporte conjunto del Banco Mundial y la CONAGUA (Banco Mundial, 2013), que analizó la situación de los recursos hídricos en el Valle de México, concluyó que el manejo actual del agua no está a la par de otras grandes aglomeraciones de la región latinoamericana y que el mismo no era ni eficiente, ni sostenible, ni equitativo. La misma fuente estimó que para compensar las deficiencias del servicio, como

¹ De acuerdo con el Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales de la Organización de las Naciones Unidas (ONU CDESC, 2003), los conceptos de suficiencia, salubridad, aceptabilidad y asequibilidad tienen las siguientes acepciones:

Suficiente. El abastecimiento de agua por persona debe ser apto y continuo para el uso personal y doméstico. Estos usos incluyen de forma general el agua de beber, el saneamiento personal, el agua para lavado de ropa, la preparación de alimentos, la limpieza del hogar y la higiene personal.

Saludable. El agua necesaria, tanto para el uso personal como doméstico, debe ser saludable; es decir, libre de microorganismos, sustancias químicas y peligros radiológicos que constituyan una amenaza para la salud humana.

Aceptable. El agua ha de presentar un color, olor y sabor aceptables para ambos usos, personal y doméstico. Todas las instalaciones y servicios de agua deben ser culturalmente apropiados y sensibles al género, al ciclo de la vida y a las exigencias de privacidad.

Asequible. El agua y los servicios e instalaciones de acceso al agua deben ser asequibles para todos. El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo sugiere que el coste del agua no debería superar el 3% de los ingresos del hogar.

falta de continuidad, cobertura de drenaje y falta de tratamiento del agua residual, la población asumía un costo económico del orden de \$28 168 millones MXN anualmente, este monto es casi el triple del monto pagado por concepto de tarifa, y que además es asumido mayoritariamente por la población más pobre y con servicios ineficientes o nulos.

Existen distintas fuentes y métodos de distribución de agua potable en el mundo, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud se consideran sistemas mejorados de abastecimiento de agua a las conexiones domiciliarias, las fuentes públicas de agua, los pozos o fuentes protegidas y la recolección de agua de lluvia. El abastecimiento de agua no mejorado significa tener pozos y fuentes sin protección y el abastecimiento de agua a través de vendedores (pipas) o agua embotellada.

La captación de agua de lluvia es una técnica ancestral usada por distintas civilizaciones a lo largo del tiempo para solventar total o parcialmente el abastecimiento de agua para consumo humano o uso agrícola, existen vestigios de su uso con más de 4000 años de antigüedad (Ballén et. al., 2006), estas tecnologías fueron una herramienta cotidiana que jugó un papel importante en las culturas mesoamericanas y a pesar de su importancia histórica su estudio sólo ha comenzado a partir de los años 90.

En la actualidad esta técnica es considerada como un método alternativo para el suministro de agua a los hogares, de gran utilidad en comunidades marginadas y recomendada en primera instancia para zonas rurales o urbano marginales. La principal limitación de la captación de agua de lluvia es la falta de continuidad del recurso, su alto costo inicial, la disponibilidad de espacio y los problemas asociados al mantenimiento y operación de los sistemas.

A pesar de los problemas que puedan presentar los sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL) estos son relevantes dentro del contexto de la Ciudad de México, pues el crecimiento desorganizado de la misma ha permitido la existencia de asentamientos humanos de difícil acceso en donde el servicio de agua potable es inexistente o muy deficiente, de manera tal que las personas deben de pagar pipas a vendedores privados o como un servicio público subvencionado por parte del gobierno para abastecerse de agua potable.

De acuerdo con el Instituto Nacional Estadística y Geografía (INEGI, 2016) en la encuesta intercensal 2015 en la Ciudad de México existían poco menos de 2.6 millones de viviendas particulares habitadas, de las cuales más de 25 mil carecían de agua entubada, la gran mayoría de estas se abastece de agua mediante pipas. Las delegaciones Tlalpan, Xochimilco, Milpa Alta e Iztapalapa concentran más del 80% de las viviendas sin agua entubada y casi el 90% del abastecimiento mediante pipas.

En un análisis sobre la viabilidad de la captación de agua de lluvia en la Ciudad de México (HESRAT Asociados S.A. de C.V., 2012) se concluyó que esta técnica no debe de promoverse como una medida generalizada, pues no se justifica económicamente, sin embargo aclararon que existen condiciones particulares dentro de la ciudad donde el abastecimiento de agua con SCALL resulta ser la opción más favorable, los autores concluyen que el suministro de agua con captación de lluvia en los techos es viable en zonas de alta precipitación, como la zona montañosa del sur de la ciudad, y en las viviendas que se abastecen totalmente o en gran medida mediante pipas.

En esta situación no sólo se encuentran viviendas, existen casos particulares como el de la Academia Mexicana de Ciencias (AMC), institución de gran importancia para el país ubicada al sur de la ciudad de México en la delegación Tlalpan. La AMC es una asociación civil independiente sin fines de lucro que constituye una de las instancias más importantes del país en la difusión, apoyo y promoción de las ciencias en sus diversas expresiones, su sede carece de un sistema de agua potable y debe de abastecerse mediante pipas para solventar las necesidades del personal que ahí labora y asistentes a eventos (bebida, preparación de alimentos, uso sanitario, limpieza y riego), de la misma manera que muchas familias de esa esa delegación.

La problemática del agua y su atención es predominantemente de tipo local, es por ello que la implementación de un nuevo método de abastecimiento requiere siempre de un análisis de los alcances de dicha técnica. Como profesionales de la ingeniería sanitaria nuestra responsabilidad radica en buscar, diseñar, gestionar y/o implementar tecnologías que ofrezcan soluciones adecuadas para evitar problemas sanitarios y aumentar el bienestar de las comunidades, en este caso los sistemas de abastecimiento de agua potable juegan un papel muy importante, este trabajo está enfocado en evaluar un posible cambio en el método de abastecimiento de agua potable en la AMC en aras de mejorar la continuidad, asequibilidad y accesibilidad a la misma.

El presente trabajo se estructura en cinco capítulos; en el primero de ellos se describe el problema a tratar definiendo el contexto de la Ciudad de México describiendo la situación actual de abastecimiento de agua en zonas altas y periurbanas de la Ciudad de México y la importancia de los SCALL como posible solución, con base en dicha información se plantearon las hipótesis del trabajo y se establecieron los objetivos del mismo.

El segundo capítulo muestra la teoría involucrada en la realización de este trabajo los antecedentes que existen sobre el tema y el marco teórico general en el que se desarrolla, en él se definen las variables involucradas, los conceptos utilizados y el enfoque del trabajo. Con base en esta información se enumeran los alcances y limitaciones del trabajo.

El tercer capítulo plasma la metodología seguida para la elaboración de este documento, se describe el enfoque que se siguió y los métodos utilizados para la recolección de los datos, dentro de este capítulo se encuentra el análisis de la información recopilada.

En el cuarto capítulo se incluye el análisis de los resultados obtenidos en donde se darán respuestas a las preguntas previamente planteadas y se demostrará o refutará la hipótesis planteada.

El último de los capítulos consistente en las conclusiones que se obtuvieron con la realización del trabajo y una serie de recomendaciones para mejorar el resultado obtenido, además de acciones que se podrían llevar a cabo en vista de los resultados. Se presentan una serie de anexos donde se describe con mayor detalle las técnicas utilizadas en la metodología y se amplía la información con la que se trabajó.

I. B. Problema de aplicación

La Academia Mexicana de Ciencias cuenta dentro de su sede con un edificio principal de oficinas, un edificio que alberga a las diversas sociedades científicas, un auditorio con capacidad de hasta 450 personas, comedor con cocina y una unidad de seminarios con capacidad de hasta 100 personas. En días de labor cotidiana la AMC tiene una población de poco menos de 100 personas, en días en que la AMC es sede de algún evento este número puede pasar a más de 550 personas. El número de eventos que tienen lugar en la AMC varía entre 10 y 12 anualmente.

Esta institución no cuenta con conexión a la red de distribución pública de agua, el abastecimiento se realiza únicamente mediante pipas. Dentro de la AMC el agua es utilizada para bebida, preparación de alimentos, uso sanitario, limpieza y riego. De los cinco edificios que utiliza la AMC cuatro cuentan con cisternas propias.

En una semana de labores normales los empleados consumen alrededor de 16 000 litros de agua esto es equivalente a la dotación semanal de 2 pipas que el programa delegacional *Provisión Emergente de Agua Potable* ha asignado a esta institución. Este servicio tiene un costo de \$70 por cada unidad, es decir \$8.75/m³. En caso de que la AMC albergue un evento es necesario adquirir agua con vendedores privados, en promedio 4 pipas para cada día de evento, los cuales normalmente duran dos días, o aproximadamente 64 000 litros, con un costo promedio de \$500 cada pipa, es decir \$62.5/m³. En un año tipo la AMC consume cerca de 1 600 000 litros de agua y gasta en ello poco más de \$55 000.

El agua que la AMC compra es almacenada en la cisterna principal ubicada debajo del Auditorio Galileo Galilei, con una capacidad de 130 m³, a partir de ahí es distribuida mayoritariamente mediante bombes hacia las cisternas particulares, depósitos elevados o directamente a la red interior del resto de las instalaciones. Este mismo inmueble cuenta con bajadas de agua pluvial y un reservorio para almacenar este escurrimiento, sin embargo, actualmente esa agua no es aprovechada pues los usuarios desconfían de su origen y calidad, razón por la cual sólo es utilizada para el riego de algunas áreas.

I. C. Hipótesis

Dada la amplia superficie disponible en la AMC y debido a que las personas que ahí laboran tienen un patrón de consumo más bajo que los habitantes de una vivienda particular, es posible que el agua captada en el techo del auditorio Galileo Galilei pueda abastecer a esta institución durante gran parte del año.

I. D. Objetivo

El objetivo de este trabajo es estimar el potencial de aprovechamiento de agua de lluvia que tiene la AMC con la infraestructura actual para proponer un plan de captación pluvial que permita maximizar el aprovechamiento de este recurso.

Como objetivos particulares se proponen:

- Realizar un análisis de oferta y demanda de agua diaria en la AMC
- Realizar un análisis de confiabilidad del sistema
- Comparar los costos entre el modo actual de abastecimiento y el que se propone en este trabajo

II. Marco teórico

II. A. Antecedentes

II. A . i. Área de estudio

México se ubica en el hemisferio norte, entre los meridianos 118°22' y 86°42' de longitud oeste y entre las latitudes 14°32' y 32°43' norte, por su ubicación geográfica la parte sur del país está situada en la zona intertropical y la parte norte en la zona templada, esta situación, aunada al relieve abrupto que existe en el país, decreta la variedad de climas existentes en el mismo e inciden en la disponibilidad de agua (CONAGUA, 2014).

La Ciudad de México, incluyendo su zona metropolitana², es la ciudad más poblada de América y la cuarta más poblada del mundo (Banco Mundial, 2013), la ciudad es un asentamiento cuya historia se remonta casi 700 años atrás, desde la fundación de Tenochtitlan en 1325 hasta la ciudad de hoy en día, ésta se encuentra al centro del país y está asentada dentro del Valle de México.

² La Zona Metropolitana de la Ciudad de México la conforman las 16 delegaciones de la Ciudad de México, 59 municipios del Estado de México y un municipio del estado de Hidalgo.

El Valle de México³, véase el mapa 1, es una unidad hidrológica cerrada (una cuenca endorreica drenada en forma artificial). Su parte más baja, una planicie lacustre, tiene una elevación de 2240 m sobre el nivel del mar. La cuenca se encuentra rodeada en tres de sus lados por una sucesión de sierras volcánicas de más de 3500 m de altitud; El Ajusco hacia el sur, la Sierra Nevada hacia el oriente y la Sierra de las Cruces hacia el poniente. Hacia el norte se encuentra, limitada por una sucesión de sierras y cerros de poca elevación; Los Pitos, Tepotzotlán, Patlachique, Santa Catarina, y otros (Ezcurra, 1996).

MAPA 1 VALLE DE MÉXICO



Fuente: CONABIO 1998. Subcuencas hidrológicas. Extraído de boletín hidrológico.

El Valle de México tiene una extensión territorial de 9739 km² que comprende 50 municipios del Estado de México, 15 municipios del Estado de Hidalgo y 4 municipios del Estado de Tlaxcala, más las 16 delegaciones políticas del Distrito Federal⁴ (CONAGUA, 2009).

³ La Subregión Valle de México está comprendida dentro de la Región Hidrológico Administrativa XIII Aguas del Valle de México junto con la Subregión Valle de Tula, y a su vez forma parte de la Región Hidrológica 26, Pánuco.

⁴ El 5 de febrero de 2016 entro en vigor el acuerdo del Pleno del Consejo de la Judicatura Federal por el que se cambia la denominación de Distrito Federal por Ciudad de México en todo su cuerpo normativo.

Dentro de la cuenca del Valle de México se encuentra la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), que abarca 7854 km², incluidos la Ciudad de México (16 delegaciones políticas) y parcialmente el Estado de México (50 municipios) y un municipio del Estado de Hidalgo (SEDESOL-CONAPO-INEGI, 2008).

La Ciudad de México se localiza entre los 19°36' y 19°03' de latitud norte y entre los meridianos 98°57' longitud este y 99°22' de longitud oeste. La ciudad colinda al Norte, Este y Oeste con el estado de México y al Sur con el estado de Morelos. La Ciudad de México se encuentra en la parte sur del Valle de México y se encuentra rodeado por la cordillera de la Sierra Madre Oriental, la mayor parte de su territorio es plano con algunas elevaciones en la parte sur. El territorio de la Ciudad de México tiene una extensión de 1499 km². Del total del territorio de la entidad el 48% pertenece al área urbana y 52% al área rural. El área total de la Ciudad de México representa el 0.1% del total de la superficie del territorio nacional siendo esta entidad la más pequeña de la República Mexicana (INAFED, 2010).

En 1970 el entonces Distrito Federal, hoy Ciudad de México, se dividió en 16 delegaciones políticas: Álvaro Obregón, Azcapotzalco, Benito Juárez, Coyoacán, Cuajimalpa de Morelos, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa, La Magdalena Contreras, Miguel Hidalgo, Milpa Alta, Tláhuac, Tlalpan, Venustiano Carranza y Xochimilco, la tabla 1 muestra la extensión territorial y población en el año 2015 de cada una de las delegaciones que conforman la Ciudad de México.

TABLA 1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS DELEGACIONES DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Delegaciones políticas	Extensión en (km ²)	Población (hab)	Densidad de población (hab/km ²)
Álvaro Obregón	93.7	749 982	8004
Azcapotzalco	34.5	400 161	11 599
Benito Juárez	28.0	417 416	14 908
Coyoacán	59.2	608 479	10 278
Cuajimalpa de Morelos	72.9	199 224	2733
Cuauhtémoc	32.0	532 553	16 642
Gustavo A. Madero	91.5	1 164 477	12 727
Iztacalco	21.8	390 348	17 906
Iztapalapa	124.5	1 827 868	14 682
La Magdalena Contreras	62.2	243 886	3921
Miguel Hidalgo	46.8	364 439	7787
Milpa Alta	268.6	137 927	514
Tláhuac	88.4	361 593	4090
Tlalpan	309.7	677 104	2186
Venustiano Carranza	30.7	427 263	13 917
Xochimilco	134.6	415 933	3090
Total	1499.1	8 918 653	5949

Fuente: INEGI 2016. Encuesta Intercensal 2015, Tabuladores básicos.

La delegación Tlalpan, véase el mapa 2, tiene la mayor área de todas las delegaciones, esta representa el 20.7% del territorio de la Ciudad de México. Las coordenadas geográficas de la delegación Tlalpan son 19° 09' 57" latitud Norte y 99° 09' 57" de longitud Oeste. Tlalpan colinda al Norte con las delegaciones Magdalena Contreras, Álvaro Obregón y Coyoacán. Al Oriente con Xochimilco y Milpa Alta; al Sur con

los municipios de Huitzilac (Morelos) y Santiago Tianguistenco (Estado de México). Al Poniente otra vez con Santiago Tianguistenco y con Xalatlaco, del mismo estado, así como con la delegación Magdalena Contreras (INEGI, 2009).

MAPA 2 UBICACIÓN DE LA DELEGACIÓN TLALPAN



Fuente: INEGI, (2006). División Municipal de México, 2005. Marco Geoestadístico Municipal.

De acuerdo con el Instituto Nacional para el Federalismo y Desarrollo Municipal (INAFED, 2010), el nombre de la delegación Tlalpan proviene de dos vocablos de origen náhuatl, "tlalli" (tierra) y "pan" (sobre). Además se añadió la palabra "firme" porque corresponde a un sitio ubicado en las riberas del lago de la Gran Tenochtitlán. La denominación natural es: "Lugar de tierra firme".

El territorio presenta en más del 70% relieve montañoso. La zona de transición hacia lo que fue el medio lacustre se encuentra hacia el Norte y el Nororiente. La máxima altitud es de 3 mil 930 metros y corresponde al Cerro de la Cruz del Marqués. La mínima es de 2 mil 260 metros y se fija en los alrededores del cruce de las avenidas Anillo Periférico y Viaducto Tlalpan (SEDUVI, 2010).

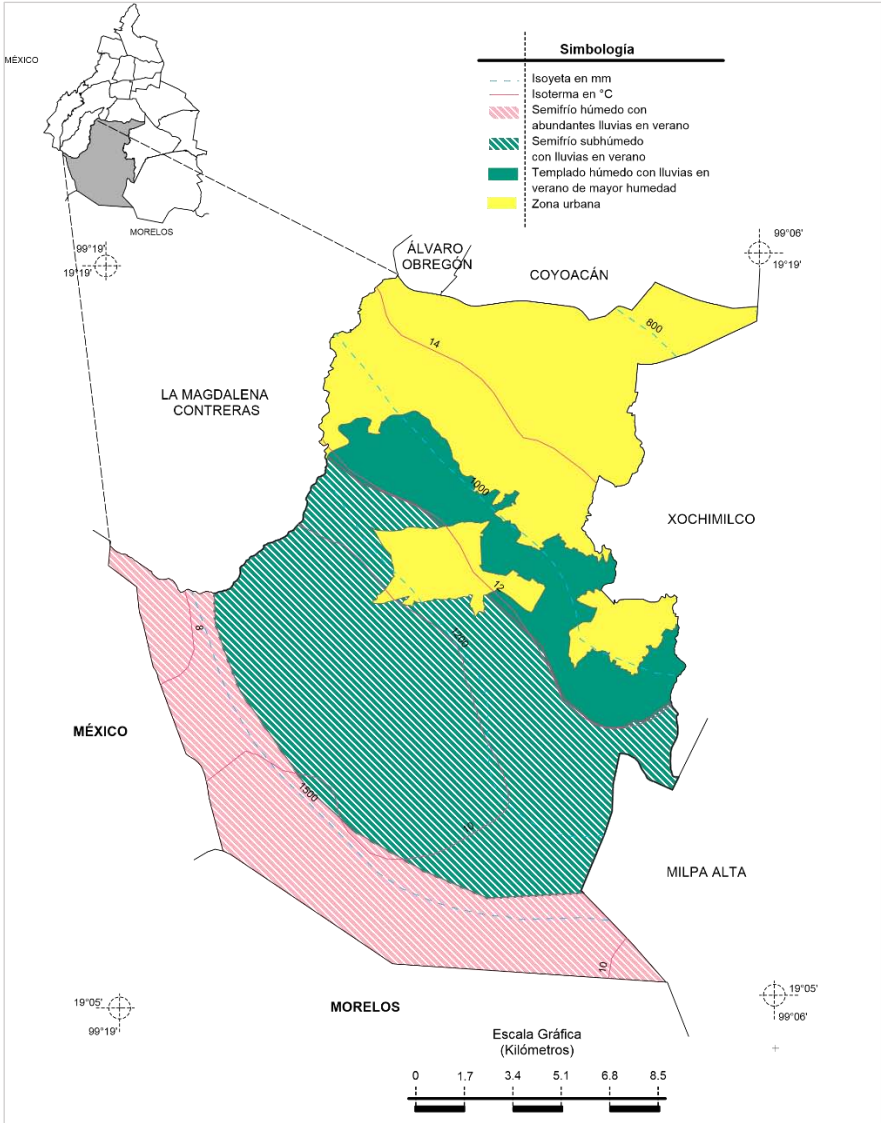
La mayor parte del territorio de la delegación corresponde a bosques (17%), vegetación secundaria (29%) y pastizales (9%); zona agrícola (29%) y el suelo urbano solamente representa el 16% (INEGI, 2008). Cerca del 80% del territorio de la delegación Tlalpan pertenece al llamado Suelo de Conservación de la Ciudad de México, que brinda importantes servicios ambientales como recarga del acuífero, regulación del clima (global y local), retención de suelos, control de inundaciones, retención de partículas suspendidas, conservación de la biodiversidad, conservación de la diversidad de cultivos y de las formas de producción, conservación de paisajes y espacios de recreación (Sheinbaum Pardo, 2016).

La última encuesta intercensal (INEGI, 2016) indica que la Ciudad de México tiene una población estimada de 8 918 653 personas. La delegación Tlalpan cuenta con 677 104 habitantes y una tasa de crecimiento anual del 1%, para el año 2015 el 47.4% de la población eran mujeres y el 52.6% hombres. De acuerdo con la Dra. Sheinbaum Pardo, jefa delegacional 2015-2018, se estima que el 94% de los habitantes de

la delegación ocupan sólo el 20% de su territorio y que la densidad promedio de población, tomando en cuenta todo el territorio es de 2078 hab/km²; sin embargo, tomando en cuenta sólo la zona urbanizada la densidad es de cerca de 10 000 hab/km² (Sheinbaum Pardo, 2016).

De acuerdo con el Programa de Desarrollo Urbano de Tlalpan (PDU-Tlalpan) dentro del territorio delegacional se presentan cinco subtipos de climas el templado subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad en el 32.32% de la superficie delegacional, el templado subhúmedo con lluvias en verano de humedad media en el 6.39% del territorio, el templado subhúmedo con lluvias en verano de menor humedad en el 0.33%, el semifrío húmedo con abundantes lluvias en verano en el 17.17% del territorio y, en el restante 43.79% se presenta un clima semifrío subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad (SEDUVI, 2010), véase el mapa 3.

MAPA 3 CLIMAS DOMINANTES EN LA DELEGACIÓN TLALPAN



Fuente: INEGI, (2005). Prontuario de Información Geográfica Municipal de los Estados Unidos Mexicanos.

La delegación Tlalpan cuenta con dos estaciones meteorológicas, la estación Ajusco y la estación El Guarda, a 2839 y 3000 metros sobre el nivel del mar respectivamente. La precipitación pluvial promedio alcanza sus mayores índices en los meses de junio a septiembre en las zonas circundantes a la estación Ajusco con alrededor de 211.9mm (septiembre) y 237.1mm (agosto), mientras que la estación El Guarda registró en promedio la mayor precipitación pluvial entre junio y octubre con índices que varían entre 110.5mm (octubre) y 283.6 mm (julio), isoyetas marcadas en el mapa 3. La temperatura media mensual promedio que alcanzó la estación Ajusco en el periodo de 1961 a 1987 fue de 11.4 °C mientras que la de El Guarda en el periodo 1965-2000 fue de 9.4 °C.

La precipitación es más abundante en las zonas altas que en las medias, el año más lluvioso en la estación El Guarda registró 2873 mm mientras que en la estación Ajusco tan solo se registraron 1448mm. En el mismo caso se encuentra el año más seco, en donde la estación Ajusco (1963) tuvo 563 mm y la correspondiente a El Guarda (1960) alcanzó los 879.8mm, en ambos casos en la estación El Guarda se duplica la cantidad de precipitación pluvial de la estación Ajusco. En promedio en el Suelo de Conservación, la precipitación pluvial oscila entre los 900 mm hasta 1500 mm anuales.

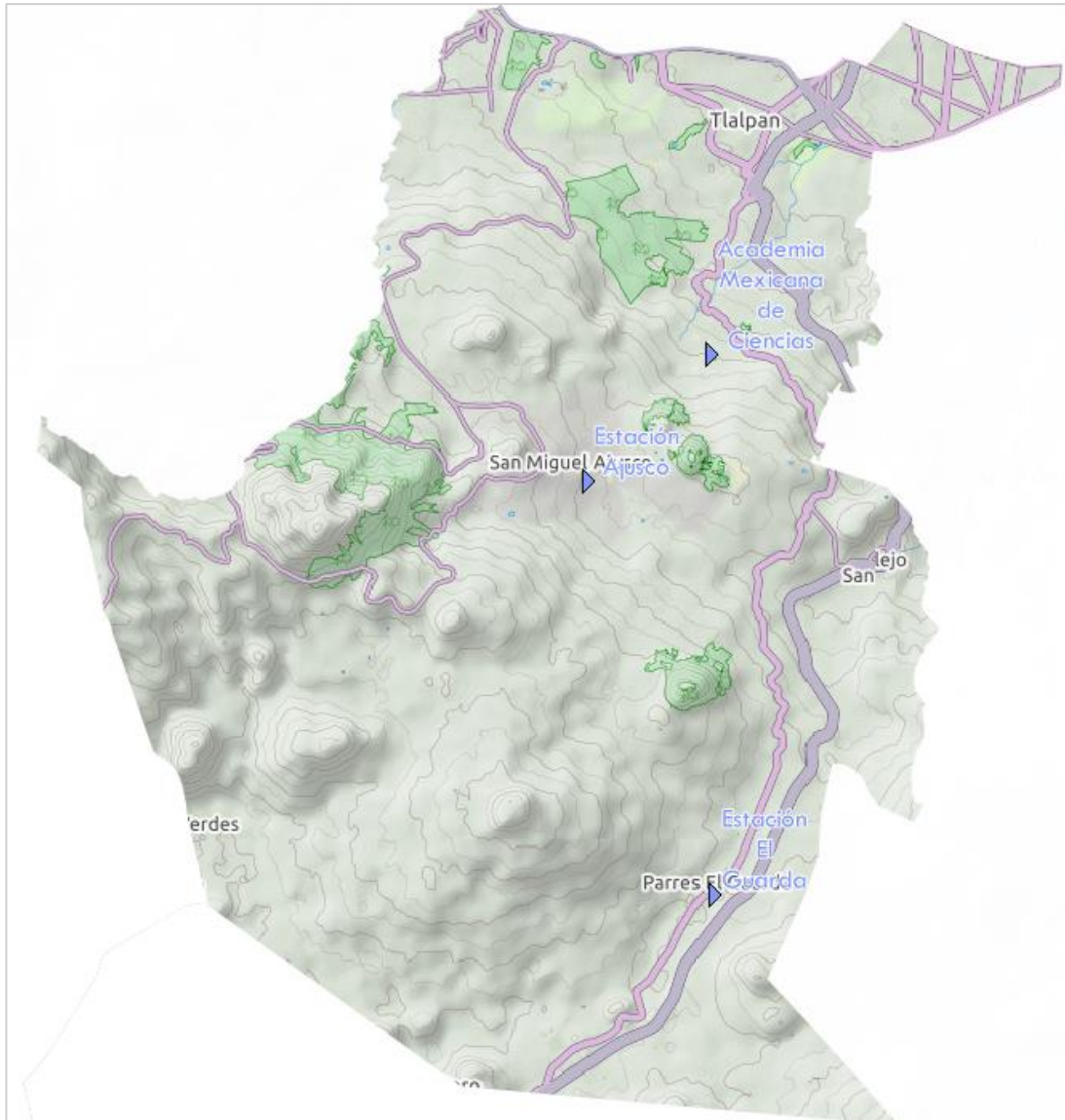
La delegación Tlalpan cuenta con 7 barrios, 125 colonias y 9 pueblos originarios. Los 9 pueblos originarios reconocidos son: Parres el guarda, San Miguel Topilejo, Santo Tomás y San Miguel Ajusco, Magdalena Petlacalco, San Miguel Xicalco, San Andrés Totoltepec, San Pedro Mártir y Chimacoyotl. Además, se reconocen también como pueblos (hoy colonias) Huipulco y Santa Úrsula Xitla.

La actual sede de la AMC se encuentra en el pueblo de San Andrés Totoltepec (Calle Cipreses s/n, km 23.5 de la carretera federal México-Cuernavaca), esta institución tiene su origen en la Academia de Investigación Científica creada en 1959 con el objetivo de ser un punto de encuentro y reflexión para los investigadores mexicanos, a partir de 1996 la Academia de la Investigación Científica se convirtió en la Academia Mexicana de Ciencias.

Hasta antes de 2001 la AMC no contaba con una sede propia, sino que residía en un inmueble prestado por la UNAM. El inmueble donde actualmente se encuentra AMC fue algún día la casa del ex jefe de la policía capitalina durante el sexenio de José López Portillo, Arturo *El Negro* Durazo, incautada por el gobierno después de la aprehensión de Durazo en 1984 la casa cayó en abandono durante 16 años. El Dr. José Antonio de la Peña, presidente de la AMC de 2002 a 2004, consideró a este inmueble como una de las muestras más patéticas de la corrupción de ciertos políticos mexicanos (de la Peña, 2002), de acuerdo con el académico la propiedad de 6.5 hectáreas contaba las siguientes instalaciones: una casa principal con 20 habitaciones, una alberca techada con discoteque, un salón de fiestas para 1000 personas, un estacionamiento para cientos de vehículos, caballerizas, un cortijo, un galgódromo, un salón de prácticas de tiro, instalaciones deportivas y más. Durazo sólo ocuparía la casa un par de años y una vez incautado se buscaron numerosos usos para el inmueble: granja, casa de la cultura, centro deportivo, etcétera. La propiedad pasó de mano en mano sin encontrar un verdadero uso, hasta que en abril de 2000, el Dr. René Drucker Colín, durante su toma de posesión como presidente de la AMC, periodo 2000-2002, pidió públicamente al entonces titular de la Secretaría de Educación Pública (SEP), Miguel Limón Rojas, una porción de este inmueble (de la Peña, 2002).

El mapa 4 muestra la ubicación de la AMC dentro del territorio de la delegación Tlalpan, así como la ubicación de las estaciones climatológicas Ajusco y El Guarda.

MAPA 4 UBICACIÓN DE LA AMC Y ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS



Fuente: Elaboración propia con datos de OpenCycleMap (openstreetmap.org).

La Academia Mexicana de Ciencias cuenta dentro de su sede con un edificio principal de oficinas, un edificio que alberga a las diversas sociedades científicas, un auditorio con capacidad de hasta 450 personas, comedor con cocina y una unidad de seminarios con capacidad de hasta 100 personas. En días de labor cotidiana la AMC tiene una población de poco menos de 100 personas, en días en que la AMC es sede de algún evento este número puede pasar a más de 550 personas. El número de eventos que tienen lugar en la AMC varía entre 10 y 12 anualmente. Dentro del predio se encuentran algunas otras edificaciones de las cuales la AMC no hace uso.

De los cinco edificios que utiliza la AMC cuatro cuentan con cisternas propias. Esta institución no cuenta con conexión a la red de distribución pública de agua, el abastecimiento se realiza únicamente mediante pipas. Dentro de la AMC el agua es utilizada para bebida, preparación de alimentos, uso sanitario, limpieza y riego. En una semana de labores normales los empleados consumen alrededor de 16 000 litros de agua

esto es equivalente a la dotación semanal de 2 pipas que el programa delegacional *Provisión Emergente de Agua Potable* ha asignado a esta institución. Este servicio tiene un costo de \$70 por cada unidad, es decir \$8.75/m³. En caso de que la AMC albergue un evento es necesario adquirir agua con vendedores privados, en promedio 8 pipas para cada evento (con una duración promedio de dos días), o aproximadamente 64 000 litros, con un costo promedio de \$500 cada pipa, es decir \$62.5/m³. En un año tipo la AMC consume cerca de 1 600 000 litros de agua y gasta en ello más de \$55 000.

El agua que la AMC compra es recibida en la cisterna principal ubicada debajo del Auditorio Galileo Galilei, con una capacidad de 130 m³, a partir de ahí es distribuida mediante gravedad hacia el edificio de oficinas y mediante bombeo con un equipo hidroneumático hacia las cisternas y a los depósitos elevado del resto de los inmuebles excepto el mismo auditorio pues su red interior se presuriza con el mismo tanque hidroneumático, la tabla 2 muestra un resumen del número de personas a abastecer por edificio así como las instalaciones con las que cuenta cada uno de ellos.⁵

TABLA 2 INSTALACIONES DE LA AMC Y SU MANERA DE ABASTECIMIENTO

Edificio	Población	Infraestructura de abastecimiento
Auditorio Galileo Galilei	Hasta 450 personas	La cisterna principal (130 m ³ de capacidad) recibe el agua directamente de las pipas, esta cisterna está equipada con un tanque hidroneumático para la distribución del agua hacia el interior del inmueble y hacia el resto de la AMC. Existen 2 cisternas de agua pluvial, una interior de 42 m ³ de capacidad y una exterior de 30 m ³ de capacidad, el agua que aquí se capta sólo se usa para el riego de jardineras y macetas.
Oficinas	60 personas	Abastecimiento por gravedad y bombeo desde la cisterna principal, cuenta con una cisterna propia de 5.5 m ³ y dos depósitos elevados de 1.1 m ³ de capacidad a partir de los cuales el agua es distribuida por gravedad hacia los muebles sanitarios.
Sociedades Científicas	20 personas	Abastecimiento por bombeo desde la cisterna principal, cuenta con una cisterna de 5.8 m ³ y dos depósitos elevados de 1.1 m ³ de capacidad a partir de los cuales el agua es distribuida por gravedad hacia los muebles sanitarios.
Cocina con comedor	Hasta 60 personas	Abastecimiento por bombeo desde la cisterna principal, cuenta con una cisterna de 6.9 m ³ y un tanque elevado de 1.1 m ³ a partir del cual el agua es distribuida por gravedad hacia los muebles sanitarios.
Unidad de Seminarios	Hasta 100 personas	Abastecimiento por bombeo desde la cisterna principal, hacia un tanque elevado de 1.1 m ³ a partir del cual el agua es distribuida por gravedad hacia los muebles sanitarios. No cuenta con cisterna propia.

Fuente: Elaboración propia.

⁵ La información referente a los costos, consumos y distribución de agua dentro de la AMC fue obtenida en entrevista personal con el Sr. Rodolfo Rojas Cruz, coordinador operativo de la Academia Mexicana de Ciencias

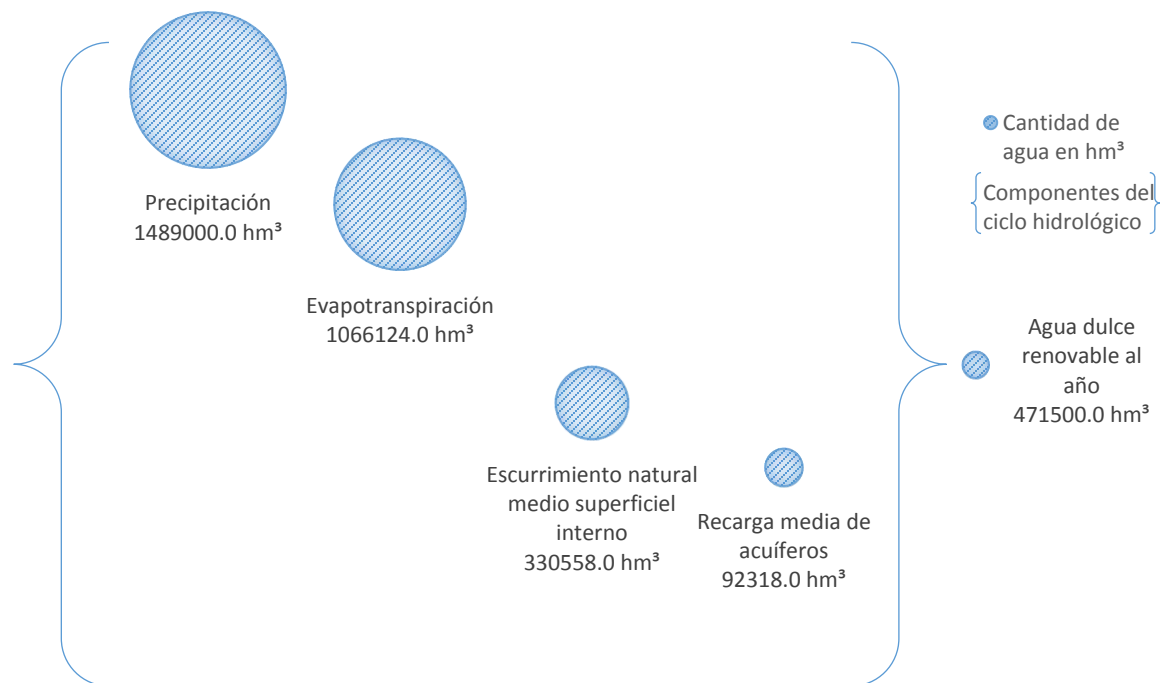
II. B. Disponibilidad de agua en México

II. B . i. Disponibilidad de agua y fuentes de abastecimiento de agua potable

El concepto de disponibilidad de agua se refiere al volumen total de líquido que hay en una región. La disponibilidad de agua depende de la dinámica del ciclo hidrológico⁶ pues refleja un balance de los procesos de evaporación, precipitación, transpiración y escurrimiento, los cuales dependen del clima, las características del suelo, la vegetación y la ubicación geográfica.

Anualmente México recibe alrededor de 1 489 000 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. Se estima que el 71.6% se evapotranspira y regresa a la atmósfera. El 22.2% escurre por ríos y arroyos, donde adicionalmente se tienen entradas y salidas con los países vecinos. El 6.2% restante se infiltra y recarga los acuíferos. Tomando en cuenta las entradas y salidas de agua con países vecinos, se cuenta con 471.5 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable al año, a lo que se denomina también disponibilidad natural media (CONAGUA, 2014), véase la figura 1.

FIGURA 1 COMPONENTES DEL CICLO HIDROLÓGICO MEXICANO (VALORES MEDIOS ANUALES)



Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA 2014. Atlas del Agua en México 2014.

⁶ De acuerdo con el Glosario Hidrológico Internacional (OMM/UNESCO, 2012) el ciclo hidrológico se define como: La sucesión de fases por las que pasa el agua en su movimiento de la atmósfera a la Tierra y en su retorno a la misma: evaporación del agua del suelo, del mar y de las aguas continentales, condensación en forma de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o en masas de agua y reevaporación.

Para saber la cantidad existente para cada habitante, el volumen de agua es dividido entre el número de personas de una población, este valor se conoce como agua renovable per cápita, por definición este valor es inversamente proporcional al número de habitantes.

De acuerdo con el Atlas Geográfico del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat, 2010) el cálculo de la disponibilidad natural media de agua, debe analizarse desde tres perspectivas:

DISTRIBUCIÓN TEMPORAL

En México existen grandes variaciones de agua renovable a lo largo del año debido principalmente a que la mayor parte de lluvia acontece en verano, mientras que el resto del año es comparativamente seco.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

En algunas regiones del país ocurre precipitación abundante mientras que en otras sucede lo opuesto. La variabilidad en la distribución espacial también se observa en la dinámica del escurrimiento natural, (volumen medio anual de agua superficial que se capta por la red de drenaje natural de la propia cuenca hidrológica).

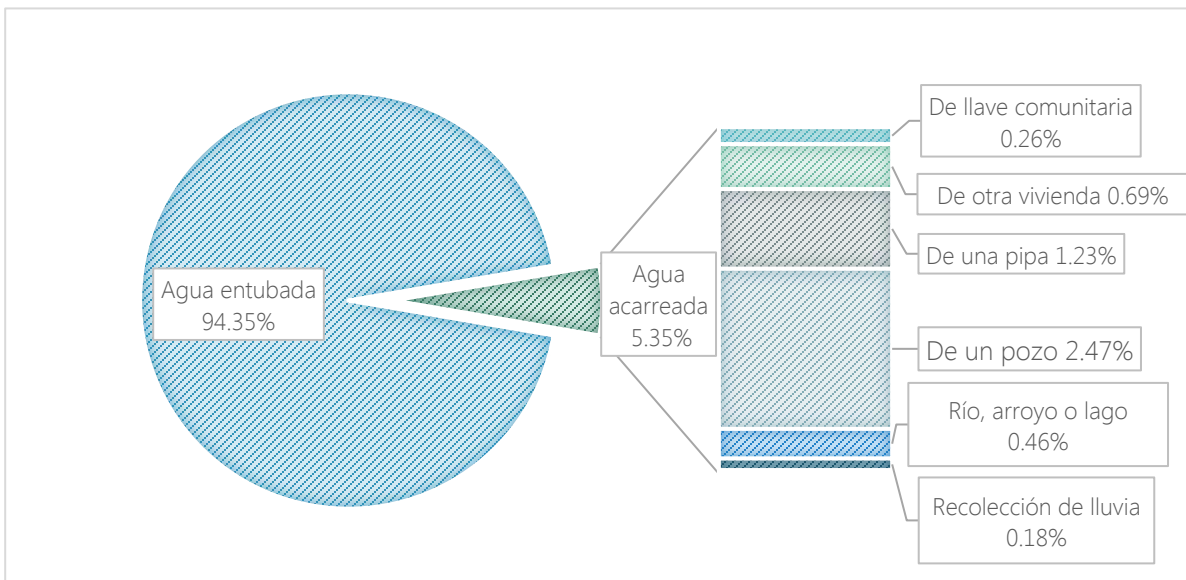
ANÁLISIS DEL SITIO

La problemática del agua y su atención es predominantemente de tipo local. Los indicadores calculados a gran escala esconden las fuertes variaciones que existen a lo largo y ancho del país.

La CONAGUA considera que la cobertura de agua potable incluye a las personas que tienen agua entubada dentro de su vivienda; fuera de la vivienda pero dentro del terreno, de la llave pública, o bien de otra vivienda, esta medida no toma en cuenta si la gente accede al agua en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible como se establece en el artículo 4° constitucional.

De acuerdo con la encuesta intercensal 2015 (INEGI, 2016) el 94.35% de la población dispone de agua entubada dentro de su propiedad el resto debe de acarrearla de distintas fuentes para tener acceso a la misma en sus hogares, las fuentes de dónde se toma el agua se muestran en la figura 2.

FIGURA 2 ACCESO AL AGUA EN MÉXICO POR TIPO DE FUENTE



Fuente: INEGI 2016. Encuesta intercensal 2015.

Con base en esta información se puede establecer que el agua es accesible para la gran mayoría de los mexicanos, de acuerdo con el INEGI entre 2000 y 2015 el porcentaje de viviendas particulares habitadas que cuentan con este servicio pasó de 88.8 a 95.5%, lo cual representa un incremento de casi siete puntos porcentuales (INEGI, 2016). Sin embargo no existen indicadores claros sobre la periodicidad del servicio, de acuerdo con los datos del Censo de Población y Vivienda 2010 del total de viviendas con agua entubada sólo poco más del 73% contaban con este servicio diariamente, mientras que un 14.77% accedía al agua cada tercer día, 8.22% lo hacía una o dos veces por semana y de manera esporádica un 3.59%.

II. B . ii. Agua en el Valle de México

Para propósitos de planeación, la CONAGUA subdivide la Región Hidrológico-Administrativa XIII en dos subregiones: Valle de México y Tula. La subregión Valle de México, esta está conformada por las 16 delegaciones políticas de la Ciudad de México y 69 municipios (50 del estado de México, 15 de Hidalgo y 4 de Tlaxcala).

Las principales fuentes de agua del Valle de México son los acuíferos locales, unos embalses menores y trasvases desde otras cuencas. Estos en conjunto aportan al Valle de México 81.9 m³/s de agua al año (CONAGUA, 2009), a los cuales se pueden agregar 6.1 m³/s de agua de reúso dentro de la cuenca, véase la tabla 2.

TABLA 3 FUENTES DE AGUA DEL VALLE DE MÉXICO

Fuente	Gasto	
	m ³ /s	Porcentaje
Acuíferos locales sostenibles	31.6	36%
Acuíferos locales sobreexplotados	27.9	32%
Fuentes superficiales locales	2.9	3%
Trasvases del Sistema Lerma	4.8	5%
Trasvases del Sistema Cutzamala	14.7	17%
Reúso de agua	6.1	7%
Total	88.0	100%

Fuente: Banco Mundial 2013. Agua urbana en el Valle de México: ¿un camino verde para mañana?

La disponibilidad de agua dentro del Valle de México ha disminuido drásticamente con el tiempo, principalmente debido a la urbanización. De 1950 a 2000 la mancha urbana aumentó 5.4 veces en tamaño, esta cantidad supera el crecimiento promedio urbano de las grandes ciudades del mundo (Breña Puyol & Breña Naranjo, 2009). La disponibilidad actual de agua en el Valle es del orden de 74 m³/habitante, lo que podría considerarse como una situación de estrés hídrico extremo (Banco Mundial, 2013).

De los 88 m³/s de los que dispone el Valle de México a la capital del país le corresponden 35 m³/s, de los cuales, el Sistema Lerma suministra entre 4 y 5.4 m³/s, dependiendo de la época del año, ya que durante la época de secas cerca de 1 m³/s se entrega a los agricultores de la zona. Del Sistema Cutzamala se obtienen entre 9 y 10 m³/s. El metro cúbico adicional del Cutzamala se suministra, dependiendo del caudal de este sistema superficial en la época de secas, para sustituir la disminución del Sistema Lerma. Alrededor de 0.8 m³/s provienen de ríos y manantiales superficiales y entre 18 y 19.8 m³/s proviene de la explotación de aguas subterráneas (Sheinbaum Pardo, 2016).

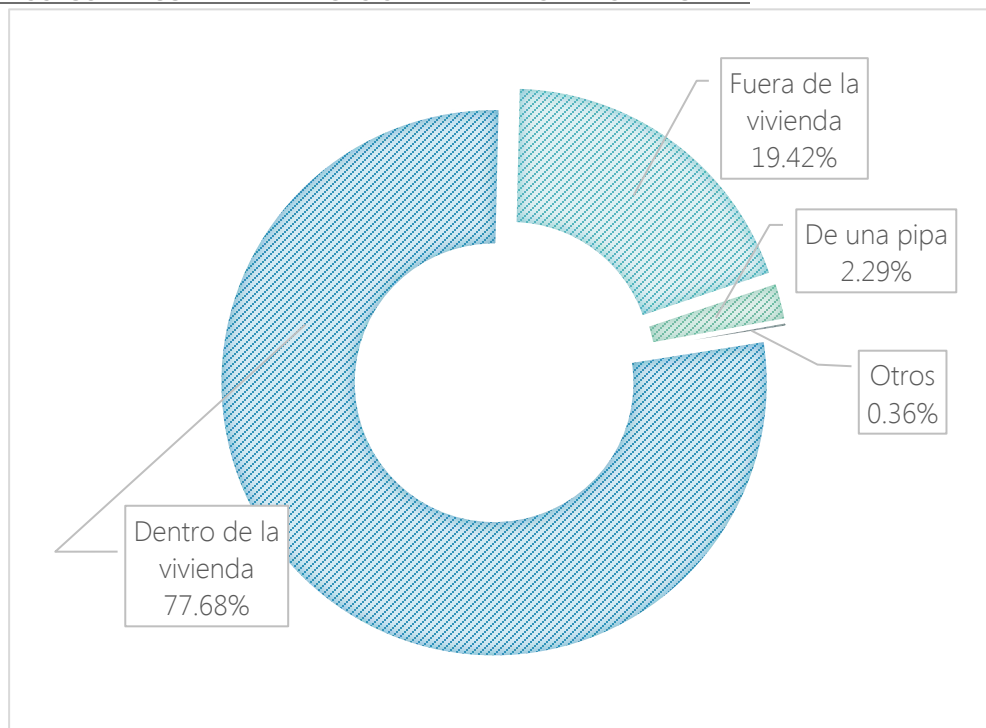
El caudal que arriba a la Ciudad de México es distribuido a través de un complejo sistema que no es exclusivo de la ciudad sino que está interconectado en toda la ZMVM. Este sistema debe su complejidad a la falta de orden en el desarrollo y ampliación del territorio urbano. Dada su naturaleza y al hecho de que la red no está aislada por sectores y es operada de forma manual el sistema presenta problemas de control de gastos y presiones.

De acuerdo con la Dra. Claudia Sheinbaum las pérdidas físicas de agua en el sistema se deben sobre todo a la antigüedad de las tuberías, el material de las mismas, los asentamientos diferenciales del suelo, los cambios bruscos de dirección y la magnitud de las presiones en las redes de distribución. Las pérdidas se encuentran entre 30 y 70%, dependiendo de la zona de la ciudad. En opinión de la académica a pesar de que este es un problema conocido no se ha destinado el recurso económico ni técnico suficiente para comenzar a resolverlo y esto limita de forma importante el acceso de la población al agua potable y disminuye el potencial de desarrollo económico de la ciudad.

II. B . iii. Agua en la delegación Tlalpan

Los datos de la encuesta intercensal 2015 (INEGI, 2016) muestran que el 77.7% de los habitantes de la delegación Tlalpan cuentan con agua entubada dentro de la vivienda, el 19.4% tiene agua fuera de su vivienda pero dentro de su propiedad y la gran mayoría restante acarrea el agua a través de pipas, unas 15 500 personas aproximadamente, véase la figura 3.

FIGURA 3 ACCESO AL AGUA EN LA DELEGACIÓN TLALPAN POR TIPO DE FUENTE



Fuente: INEGI 2016. Encuesta intercensal 2015.

De acuerdo con el Programa Delegacional de Desarrollo Urbano para la Delegación Tlalpan (SEDUVI, 2010), la infraestructura hidráulica de la delegación se divide en ocho subsistemas mediante los cuales se abastece y distribuye el agua potable. La topografía accidentada de la Delegación obliga a que la distribución se realice por medio de tanques de regulación que abastecen por gravedad a las zonas bajas y a través de rebombes escalonados se dota a las partes altas.

El documento antes citado remarca que las principales fuentes de abastecimiento de esta demarcación son los 8 manantiales localizados en el cerro del Ajusco y 93 pozos profundos ubicados al norte y centro de la delegación, así como 4 pozos de uso particular. El gasto aportado por las fuentes de abastecimiento considerando los manantiales y los pozos operados por el sector público suma más de 3000 l/s.

Para dotar a las zonas que carecen de infraestructura se cuenta con garzas de agua potable desde donde el agua es acarreada a los hogares mediante pipas. Los manantiales de la zona de Fuentes Brotantes y Cuicuilco coadyuvan al abastecimiento del agua potable por medio de pipas a zonas sin servicio o con servicios intermitentes.

Las familias del Ajusco Medio y de los pueblos originarios de Tlalpan, son quienes más resienten la falta de agua, debido a la baja presión con la que se distribuye el líquido del sistema Cutzamala y la falta de mantenimiento a tuberías (Tlalpan, 2017). Tlalpan cuenta con 7 barrios, 125 colonias y 9 pueblos originarios.. Además existen 206 asentamientos irregulares, de los cuales sólo el 23% recibe el servicio de agua a través de la red de manera intermitente (Sheinbaum Pardo, 2016).

Debido a los problemas de continuidad y presión en la red de abastecimiento y a la falta de la misma en ciertas zonas, la delegación Tlalpan repartió 1 200 000 m³ de agua en pipas a través del programa Provisión Emergente de Agua Potable durante el 2016 (CDMX, 2016). En conjunto con otros gastos para mantenimiento y mejora de la infraestructura hidráulica la delegación Tlalpan destinó el año pasado 10 millones de pesos más para la instalación de sistemas captación de agua pluvial en viviendas de alta y muy alta marginalidad (Tlalpan, 2017), ya en 2015 se habían instalado 487 sistemas domiciliarios de captación de agua de lluvia y al menos 10 sistemas en escuelas públicas (Mundo Agua y Saneamiento, 2015).

La delegación Tlalpan ha tenido problemas históricos para abastecer de agua a su población y aún hoy en día continúa siendo una de las delegaciones con mayores problemas en este rubro.

II. B . iv. Cantidad de agua y salud

El agua es un recurso de interés esencial para la sociedad, tiene carácter de bien público; por otra parte, debido a que es utilizada en muchos procesos productivos, se vuelve un insumo y un bien básico en la generación de valor. Ambas condiciones con frecuencia entran en controversia y son motivo de conflicto. En 2010 la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció el derecho humano al agua y saneamiento, también reconoció que el agua potable y el saneamiento son esenciales para la realización de todos los derechos humanos.

El Dr. Julio Boltivink afirma que la forma de acceso al agua, su calidad, cantidad y periodicidad determinan las condiciones en las cuales se realizan las actividades más básicas de consumo e higiene, adecuadas o no, que implican riesgos sanitarios, de salud y cargas adicionales de trabajo como el acarreo (Boltivink,

2009). De la misma manera la deficiencia en el estado de salud coligada a los déficits de agua y saneamiento aqueja a la productividad y al crecimiento económico, reforzando las desigualdades que perpetúan ciclos de pobreza en los hogares vulnerables.

En mayor medida las deficiencias en el abastecimiento de agua que existen en los sistemas actuales de distribución son resueltas por el usuario a costa de su bolsillo y el sacrificio o postergación de satisfacer otras necesidades. Expertos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) indican que: si bien la necesidad básica de agua incluye el agua que se usa en la higiene personal, no resulta significativo establecer una cantidad mínima ya que el volumen de agua que usen las viviendas dependerá de la accesibilidad, la que se determina principalmente por la distancia, el tiempo, la confiabilidad y los costos potenciales (Howard y Bartram, 2003).

A partir de los factores antes mencionados la OMS decidió categorizar la accesibilidad en términos del nivel de servicio. Los beneficios a la salud pública que ofrece el uso de mayores volúmenes de agua generalmente dan como resultado dos mejoras principales; la primera se refiere a la superación de la falta de acceso básico debido a las distancias y al tiempo de recolección del agua que dan lugar al uso de volúmenes inadecuados para la higiene básica personal y para el consumo humano y la segunda mejora significativa para la salud ocurre cuando se dispone de agua en la vivienda.

La tabla 3 resume el grado en el que los diferentes niveles del servicio pueden atender los requisitos para mantener una buena salud.

TABLA 4 CANTIDAD DE AGUA DOMICILIARIA, NIVEL DE SERVICIO, ACCESO, NECESIDADES ATENDIDAS E IMPACTOS EN LA SALUD

Nivel del Servicio	Medición del Acceso	Necesidades Atendidas	Nivel del Efecto en la Salud
Sin acceso (cantidad recolectada generalmente menor de 5 l/hab· día)	Más de 1000 m o 30 minutos de tiempo total de recolección	Consumo.- no se puede garantizar Higiene.- no es posible (a no ser que se practique en la fuente)	Muy alto
Acceso básico (la cantidad promedio no puede superar 20 l/hab· día)	Entre 100 y 1000 m o de 5 a 20 minutos de tiempo total de recolección	Consumo.- se debe asegurar Higiene.- el lavado de manos y la higiene básica de la alimentación es posible; es difícil garantizar la lavandería y el baño a no ser que se practique en la fuente	Alto
Acceso intermedio (cantidad promedio de aproximadamente 50 l/hab· día)	Agua abastecida a través de un grifo público (o dentro de 100 m o 5 minutos del tiempo total de recolección)	Consumo.- asegurado Higiene.- la higiene básica personal y de los alimentos está asegurada; se debe asegurar también la lavandería y el baño	Bajo
Acceso óptimo (cantidad promedio de 100 l/hab· día y más)	Agua abastecida de manera continua a través de varios grifos	Consumo.- se atienden todas las necesidades Higiene.- se deben atender todas las necesidades	Muy bajo

Fuente: Howard y Bartram 2003. Domestic water quantity, service level and health, OMS 2003.

La división de Agua Saneamiento y Salud (ASS) de la OMS establece que se consideran sistemas mejorados de abastecimiento de agua a las siguientes tecnologías: conexiones domiciliarias, fuentes públicas de agua, pozos protegidos o fuente protegida y recolección de agua de lluvia. El abastecimiento de agua no mejorado significa tener pozos sin protección, fuentes no protegidas, abastecimiento de agua a través de vendedores o agua embotellada.

Mientras que la cantidad de agua recibida es un aspecto fundamental la calidad del agua que se recibe no puede dejarse de lado, según informes de las Naciones Unidas y la Organización Mundial de la Salud la mala calidad del agua y el saneamiento irregular afectan gravemente el estado sanitario de la población; sólo el consumo de agua contaminada causa cinco millones de muertes al año (UNESCO, 2006).

El acceso a agua potable y servicios de saneamiento adecuados ha demostrado ser una de las maneras más eficaces de mejorar la salud humana. La OMS ha estimado los costos económicos evitados por diversos niveles de inversión en servicios de agua y saneamiento: cada \$1 USD invertido en la mejora de abastecimiento de agua y saneamiento arroja ganancias de \$4 a 12 USD, dependiendo del tipo de intervención.

El acceso al agua potable y a servicios de saneamiento adecuados es vital para la salud humana, pero tiene otros beneficios significativos que van desde los fácilmente identificables y cuantificables (costos evitados o ahorro de tiempo) a la más intangible (comodidad, bienestar, dignidad, privacidad, seguridad, etcétera).

II. C. Sistemas de Captación de Agua de Lluvia

II. C . i. Definición

La literatura reporta distintas definiciones sobre lo que es y para qué se usa un sistema de captación de agua de lluvia, desde la simple colecta y recolección de agua de lluvia que escurre en superficies impactadas directamente por la misma (Pacey & Cullis, 1986), o un recurso hídrico alternativo sustentable que ayuda a suavizar las variaciones en otros tipos de abastecimiento (Seo, Sun, & Young-Oh, 2015), o el amplio espectro de tecnologías utilizadas para colectar y almacenar agua de lluvia como una fuente renovable y limpia de agua (Fayez & A.W., 2009), etcétera. En términos generales un sistema de captación de agua de lluvia (SCALL) constituye un medio para interceptar la precipitación con el objetivo de obtener agua, almacenarla y poder disponer de ella para darle un determinado uso, con o sin un tratamiento previo.

Los SCALL pueden ser clasificados como activos y pasivos; los sistemas activos son aquellos que recolectan la lluvia, la filtran y la almacenan para reusarla (son fácilmente identificables debido a sus componentes; tanques y cisternas, bombas y filtros, etcétera) y los sistemas pasivos son aquellos que no tienen componentes mecánicos para recolectar, limpiar y almacenar el agua, la idea principal en estos sistemas es recolectar el agua en zonas específicas en la topografía para que pueda ser absorbida por el suelo de forma natural (reúso indirecto) (Kinkade-Levario, 2007).

Los SCALL también pueden ser clasificados por su uso, entre las distintas categorías que pueden existir se encuentran: los sistemas para uso humano, sistemas para uso agrícola, acuícola o ganadero, sistemas para recarga de agua hacia los acuíferos, entre otros. Este trabajo está enfocado en los sistemas para uso humano.

De acuerdo con la Unidad de Apoyo Técnico en Saneamiento Básico Rural de la Organización Panamericana de la Salud “En la captación del agua de lluvia con fines domésticos se acostumbra a utilizar la superficie del techo como captación, conociéndose a este modelo como SCAPT (sistema de captación de agua pluvial en techos). Este modelo tiene un beneficio adicional y es que además de su ubicación minimiza la contaminación del agua” (UNATSABAR, 2001).

II. C . ii. Reseña histórica

Diferentes formas de captación de agua de lluvia se han utilizado tradicionalmente a través de la historia de las civilizaciones; pero estas tecnologías sólo se han comenzado a estudiar y publicar recientemente (a partir de los años 90) (Ballén Suárez, Galarza García, & Ortiz Mosquera, 2006). Con base en la distribución de restos de estructuras de captación de agua de lluvia en el mundo y el continuo uso de estas obras en la historia, estos autores concluyeron que las técnicas de captación de agua de lluvia cumplieron un papel importante en la producción agrícola y en la satisfacción de las necesidades domésticas, con un uso intensivo en las regiones áridas o semiáridas del planeta.

Colectar y almacenar el agua de lluvia no es una idea nueva o reciente, civilizaciones de distintas culturas han utilizado esta técnica a lo largo de milenios, los ejemplos más antiguos datan de hace poco más de 4000 años en el Desierto de Negev, civilizaciones antiguas, como aquellas que se desarrollaron en partes altas de Yemen ya contaban en el año 1000 a.C. con edificaciones diseñadas con patios y terrazas para la captación y almacenamiento de agua de lluvia. En la provincia de Gansu, China, existían pozos y jarrones para la captación de agua de lluvia desde hace más de 2000 años y en Irán los *Abarbans*, son sistemas tradicionales locales muy antiguos usados para la captación y almacenamiento de agua de lluvia (Ballén Suárez, Galarza García, & Ortiz Mosquera, 2006).

Quizás el ejemplo más representativo corresponde a la civilización Romana, durante la República (siglos III y IV a.C.), durante esa etapa la ciudad de Roma consistía casi en su totalidad de viviendas unifamiliares, las cuales contaban con un espacio principal a cielo abierto denominado *Atrio*, en el que se instalaba un reservorio central para recoger el agua de lluvia llamado *Impluvium*, el agua de lluvia ingresaba por un orificio en el techo denominado *Compluvium*.

En cuanto a la captación de agua de lluvia en el país, el libro *Semblanza Histórica del Agua en México* (CONAGUA, 2011) menciona que:

La recolección y el almacenamiento de agua pluvial fueron prácticas comunes en Mesoamérica desde tiempos muy antiguos, fuera en recipientes en depósitos subterráneos, o a cielo abierto. El agua se captaba mediante canales y zanjas, aprovechando el agua rodada (en patios y casas, o en el campo, en jagüeyes, mediante bordos, entre otros), o bien, conduciéndola desde los techos de las viviendas y edificios por medio de canoas o canjilones de madera o pencas o canalitos, a los depósitos. En las viviendas el agua se almacenó en recipientes de barro,

enterrados o no, así como en pilas o piletas de barro, cal y canto, piedra, excavados en el suelo, recubiertos o no con piedra o argamasa y estuco.

Entre las tecnologías de almacenamiento subterráneo de agua de lluvia utilizadas en México destacan por su antigüedad; los de San José Mogote (1000 a.C.) y Tierras Largas (1000-900 a.C.), en el estado de Oaxaca. Los *Chultunes* o cisternas mayas, relevantes obras creadas para la captación y almacenamiento del agua pluvial predominantes en regiones donde se carece de fuentes naturales superficiales de agua, los cuales se cuentan por miles en la península de Yucatán y que de acuerdo con la Dra. Renée Zapata fueron vitales para los asentamientos prehispánicos y actuales (Zapata Peraza, 1985).

Dentro de los depósitos pluviales a cielo abierto se destacan los *Jagüeyes*, que florecieron muy comúnmente en el centro y sur de México, especialmente en zonas áridas y semiáridas donde el nivel freático estaba muy bajo o el suelo era rocoso y resultaba muy difícil alcanzarlo mediante la excavación de pozos. El agua que se canalizaba hacia los *Jagüeyes* provenía de corrientes pluviales o de los escurrimientos de los cerros y techos aledaños (CONAGUA, 2011).

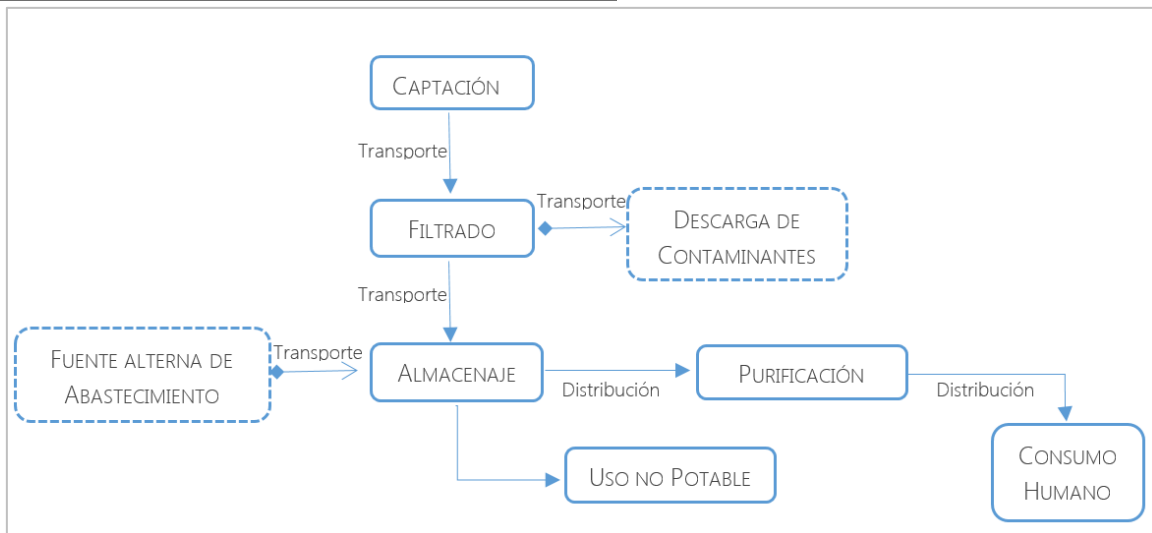
De acuerdo con *Semblanza Histórica del Agua en México* (CONAGUA, 2011) el aprovechamiento del agua de lluvia menguó a causa de la imposición de métodos y obras para la utilización del agua superficial y subterránea, como ejemplo en la península de Yucatán se dejó de utilizar el agua lluvia ya que la colonización española en el siglo XVI introdujo sistemas de agricultura, animales domésticos, plantas y métodos de construcción europeos.

Debido a las colonizaciones los nativos se vieron obligados a abandonar las metodologías tradicionales para hacerse de agua, de esta manera se relegó la posibilidad de uso de los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia u otros sistemas alternativos como métodos de abastecimiento para la población.

II. C . iii. Componentes de un Sistema de Captación de Agua de Lluvia

Los componentes de un SCALL son *Captación, Transporte, Filtración, Almacenaje, Distribución y Purificación* (Kinkade-Levario, 2007). La figura 4 describe los principales componentes de los SCALL.

FIGURA 4 ESQUEMA DE LOS COMPONENTES DE UN SCALL



Fuente: Adaptado de Kinkade-Levario 2007. *Design for water, rainwater harvesting, stormwater catchment and alternate water reuse.*

A continuación se resumen los aspectos principales de estos elementos:

CAPTACIÓN

Es el área de la superficie, comúnmente una azotea, donde el agua de lluvia se recibe y eventualmente es recolectada.

Para fines no potables el agua de lluvia recolectada puede ser captada por una superficie de cualquier material. En el caso de usos potables los mejores materiales son el concreto y el barro. Es muy importante tomar en cuenta que para consumo humano no se deben de usar techos que contengan recubrimientos de zinc, cobre, asbestos o componentes de asfalto ni que hayan sido pintados con productos fabricados con plomo.

El agua de lluvia es ligeramente ácida, lo que significa que disolverá y acarreará minerales desde el área de captación al sistema de almacenaje. Es necesario tomar en cuenta este detalle para saber que componentes tienen que ser removidos por el sistema de filtrado antes del almacenamiento o conducidos hacia el sistema de drenaje antes del filtrado.

El potencial de cosecha es la cantidad de agua que puede ser efectivamente captada. Sólo un máximo de 90% de la precipitación puede ser captada por un SCALL. La calidad del agua recolectada depende de la textura del material utilizado para captar, el agua incrementa su calidad con materiales de superficie más impermeables. La calidad del agua recolectada también es determinada por la frecuencia de las lluvias, la duración de una tormenta, la cantidad de lluvia y el tiempo transcurrido entre una tormenta y otra son factores que afectan la captación.

SISTEMA DE TRANSPORTE

Son los componentes que llevan el agua desde la superficie de captación al primer filtro y desde éste hacia el sistema de almacenaje.

Un sistema de transportación está conformado por canales y bajante. Estos elementos dirigen la lluvia desde la azotea hacia cisternas o tanques de almacenamiento. Los materiales de las canaletas y las bajantes varían desde diversos plásticos y acero galvanizado hasta aluminio, cobre y acero inoxidable.

Para fines potables, únicamente la tubería de PVC es la adecuada, ya que sólo este tipo de tubería se fabrica con materiales vírgenes o no reciclados que pudieron haberse contaminado por sus usos previos. Tuberías recubiertas de aluminio también son aptas para usos potables.

Para evitar el transporte de hojas y basura desde una azotea, es importante la colocación de una rejilla en que cubra toda la canal que recolectará el agua. Las rejillas son importantes ya que reducen la frecuencia en el mantenimiento, eliminan materiales combustibles de la azotea y reducen ambientes para la formación de mosquitos.

FILTRADO

Es el proceso por el cual se reduce la cantidad de basura y materia sedimentable que pudieran entrar a un SCALL.

Las azoteas al ser áreas expuestas a la intemperie reciben basura, hojas, sedimentos y contaminantes constantemente en su superficie. El agua de lluvia arrastra estos elementos durante cualquier tormenta. El agua que cae al principio de la tormenta arrastra la más alta concentración de desechos y

contaminantes. El agua de estos arrastres deberá ser desalojada hacia el sistema de drenaje como medida preventiva para reducir riesgos de contaminación.

El tamaño de los sistemas de filtrado depende del tamaño de la superficie de captación y el uso final que se la dará al agua. El agua recolectada de una azotea estará más limpia que la recolectada de un patio o pavimento, lo que significa que las características de los filtros serán distintas para cada caso.

ALMACENAJE

Las cisternas y los tanques de almacenamiento son aquellos componentes que permiten guardar el agua para un futuro uso.

Los tanques de almacenamiento y las cisternas son los componentes más caros de un sistema SCALL, representan aproximadamente el 90% de la totalidad del costo del sistema. Estos sistemas pueden dividirse en tres tipos: almacenamiento a nivel de superficie, sistemas subterráneos y sistemas integrados a un edificio. Tienen tres partes: la base, las paredes y la cubierta, todas tienen que ser impermeables.

Un tanque o cisterna debe de ser duradero, resistente (empuje del agua), impermeable, limpio, con una superficie adecuada en el interior, debe de usar selladores no tóxicos y tienen que ser fáciles de operar. En zonas marginadas la mejor opción serían tanques de operación manual.

La tapa necesita sellar apropiadamente para prevenir la evaporación, la generación de mosquitos y la intrusión de insectos u otros animales. Los tanques no deben permitir que entre la luz del sol para no propiciar el crecimiento de algas.

Los factores básicos para decidir qué sistema es el mejor para cada proyecto son: las opciones que se presentan en cada localidad (material y mano de obra local), el espacio disponible, la cantidad de agua a ser almacenada (demanda), el costo de construcción y el costo de excavación.

DISTRIBUCIÓN

Es el sistema que lleva el agua desde la zona de almacenaje hasta donde va a ser usada.

El agua almacenada puede ser distribuida por medio de sistemas de bombeo o por gravedad. Es necesario esperar lo suficiente entre una tormenta y el inicio del bombeo, ya que los sedimentos tardan un tiempo en asentarse.

PURIFICACIÓN

Sólo el agua destinada para el consumo humano debe de ser purificada.

Un sistema de purificación incluye un proceso de filtración, un proceso de desinfección y algún equipo de control de pH y turbiedad. La desinfección solar es un método de tratamiento del agua de muy fácil aplicación (y muy recomendable en zonas rurales) que aprovecha la radiación solar para mejorar la calidad bacteriológica del líquido, tiene las ventajas de ser efectivo, de bajo costo y que no cambia el sabor del agua.

Es muy importante que a todos los componentes de un sistema SCALL se les dé mantenimiento continuo (limpieza y reposición de partes deterioradas o gastadas) para evitar que la basura y otros contaminantes deterioren el sistema. Para un correcto funcionamiento hay que inspeccionar y reparar partes dañadas.

II. C . iv. Entorno de aplicación

Sobre la aplicación de la captación de agua de lluvia como sistema de abastecimiento la mayoría de los autores coinciden en que su aplicación de manera generalizada es complicada, se requiere de condiciones específicas que compliquen la utilización de sistemas convencionales (aislamiento, orografía, dispersión, falta o agotamiento de fuentes cercanas, etcétera) y además su efectividad se ve limitada a los regímenes de precipitación y a la infraestructura con la que se cuente. La mayoría de las veces la captación de agua de lluvia es usada como un sistema alternativo y/o complementario de abastecimiento de agua.

Sin embargo, cuando existen condiciones favorables para el uso de esta tecnología se convierte en una opción altamente benéfica para los usuarios. De acuerdo con un estudio realizado en 2012 con el objetivo de determinar la viabilidad de esta alternativa en la Ciudad de México (HESRAT Asociados S.A. de C.V., 2012), se identificó que: “la participación de la autoridad en la captación de lluvia en los techos sólo estaría justificada cuando el suministro de agua a los domicilios se hace exclusiva o fundamentalmente con pipas”. Este mismo estudio determinó que la captación de agua compite en costos con el abastecimiento mediante pipas, para ese mismo año se estimaba que en la Ciudad de México existían unas 70 000 viviendas en estas condiciones.

Esta firma de ingeniería concluyó que: “como medida generalizada no está justificada la captación directa de agua de lluvia pues es una forma cara, problemática para el usuario y de alcances reducidos... efectivamente, si se hiciera la captación de agua de lluvia en todos los techos de la ciudad se podría captar un volumen equivalente al 8% del suministro actual con una inversión, estimada en forma conservadora, de entre 30 y 40 mil millones de pesos”.

En opinión de los autores de este estudio la pregunta en torno al uso de los SCALL no estriba en su viabilidad, ciertamente siempre será posible captar, almacenar y usar la precipitación, sino en la conveniencia económica y operativa para suministrar agua con esta tecnología. Sobre la calidad del agua captada los autores afirman que es tal que mediante sencillos métodos de tratamiento (filtración y desinfección, etcétera) se obtendría agua potable.

Partiendo del entendido de que esta tecnología tiene limitaciones para su aplicación a gran escala, podemos concluir que las comunidades marginadas y con sistemas de abastecimiento ineficientes situados en zonas de alta precipitación se erigen como los candidatos más adecuados para el uso de SCALL.

De acuerdo con el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria (UNATSABAR, 2001) en el diseño de un sistema de captación de agua de lluvia es necesario considerar los factores técnicos, económicos y sociales.

FACTORES TÉCNICOS

Los factores técnicos a tener presente son la producción u oferta y la demanda de agua. La *producción u oferta de agua*, está relacionada directamente con la precipitación durante el año y con las variaciones estacionales de la misma. La *demanda de agua* depende de las necesidades del interesado y puede estar representada solamente por el agua para consumo humano, hasta llegar a disponer de agua para todas

sus necesidades básicas como son preparación de alimentos, higiene de personal, lavado de vajillas y de ropa e inclusive riego de jardines.

FACTOR ECONÓMICO

El factor económico incide en las inversiones necesarias para disponer de un área de captación y volumen de almacenamiento. Los altos costos iniciales resultan ser una restricción que imposibilita el uso de SCALL a la mayor parte de los interesados. Los costos del sistema propuesto deben ser comparados con los costos de otras alternativas de abastecimiento de agua.

FACTOR SOCIAL

Los factores sociales están representados por los hábitos y costumbres que puedan afectar al éxito de la intervención. Al efecto, el profesional responsable debe discutir con los posibles usuarios las ventajas y desventajas de la manera tradicional de abastecimiento de agua y de la tecnología propuesta. Este análisis debe considerar la conveniencia de adoptar soluciones individuales y/o colectivas, el tipo de material de sus techos, la existencia de materiales alternativos y el grado de participación que los usuarios decidan tener.

II. D. Alcances y limitaciones

El contenido de este trabajo abarca solamente el abastecimiento de agua de la AMC mediante el aprovechamiento del agua de lluvia y supone que la distribución hacia su interior continuará como se ha venido haciendo desde hace años. El trabajo se limita a la captación de agua con la infraestructura ya existente en el auditorio Galileo Galilei de la AMC y la inclusión de algunas adecuaciones menores. Este trabajo hará uso de la información más confiable disponible y en caso de inexistencia de la misma se harán consideraciones que justifiquen el uso de una estimación ingenieril.

Este trabajo se limita a proponer un plan de captación de agua de lluvia que permita maximizar el aprovechamiento de este recurso dentro de la AMC en pos de reducir los costos e inconvenientes que genera su actual método de abastecimiento.

III. Metodología

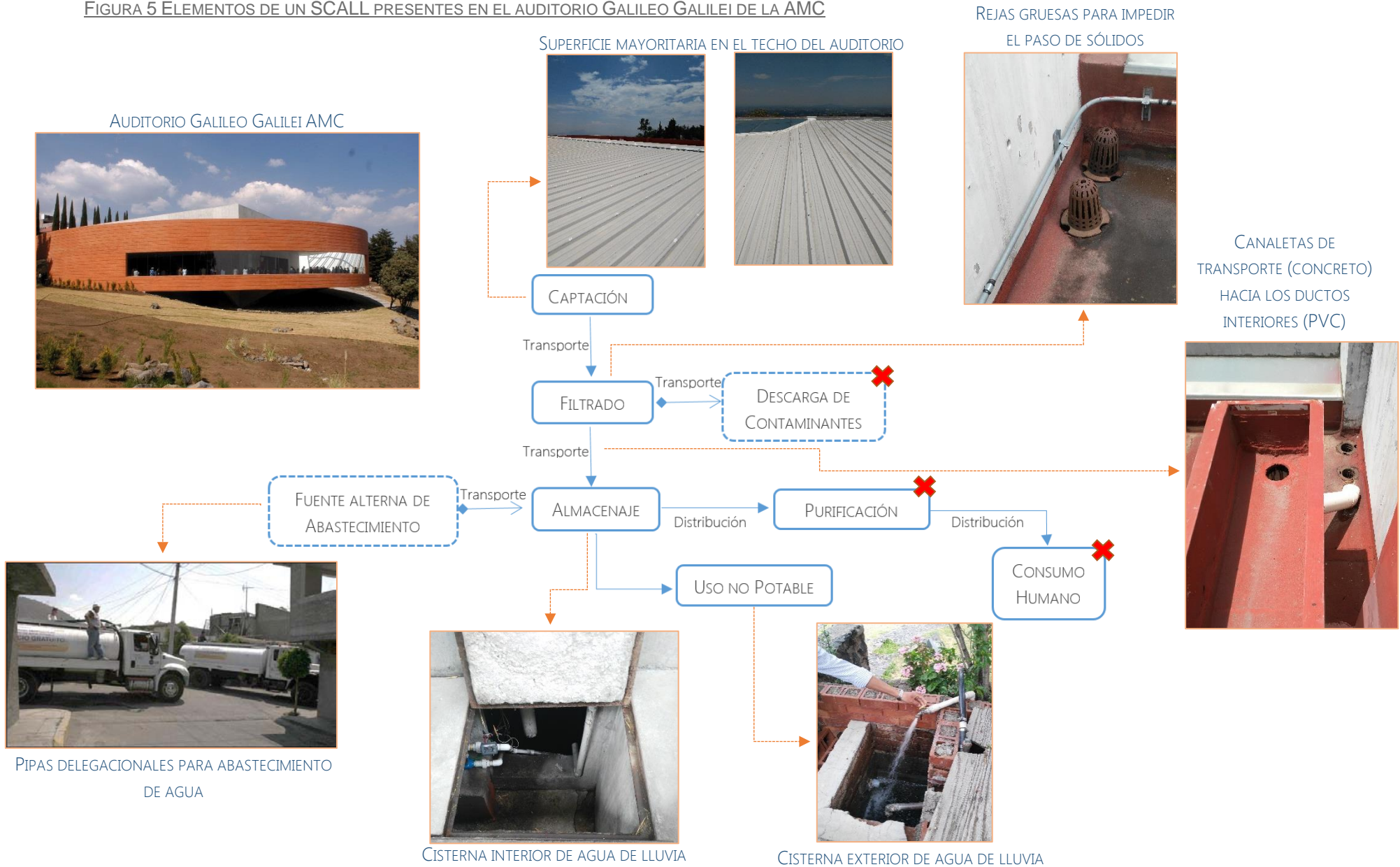
III. A. Recolección de datos

La información necesaria para la determinación del potencial de captación de agua de lluvia en la AMC se reduce al conocimiento de los elementos de un SCALL con los que ya cuenta la AMC, especialmente el área de captación, y los datos concernientes a la precipitación. Esta información es correlacional pues el agua que va a ser consumida y/o usada es proporcional a la que precipita y es interceptada es por la superficie destinada a la captación.

La información sobre los elementos de un SCALL con los que ya cuenta el auditorio Galileo Galilei de la AMC fue derivada a partir del inventario de la infraestructura actual, véase el apartado II.A.i Área de estudio, y fue obtenida a partir de una inspección y recorrido por las instalaciones de la AMC, así como entrevistas personales con el personal de esta institución. A partir de esas visitas se determinó al auditorio Galileo Galilei como el sitio para la implementación de un SCALL. Como se mencionó anteriormente este inmueble cuenta con bajadas de agua pluvial que conectan a un reservorio de 42 m³ de capacidad en donde el agua es actualmente almacenada más no usada y hacia una cisterna exterior de 30 m³ de capacidad de la cual el agua es extraída para el riego, este edificio cuenta a su vez con una cisterna de agua potable de 130 m³ de capacidad a partir de la cual el agua es derivada hacia las distintas instalaciones de la AMC.

En el apartado II.C.iv se encuentra una descripción de los componentes de un SCALL, la figura 5 retoma ese mismo esquema y hace un recuento de los elementos de un SCALL con los que ya cuenta este edificio, así como aquellos que hacen falta:

FIGURA 5 ELEMENTOS DE UN SCALL PRESENTES EN EL AUDITORIO GALILEO GALILEI DE LA AMC

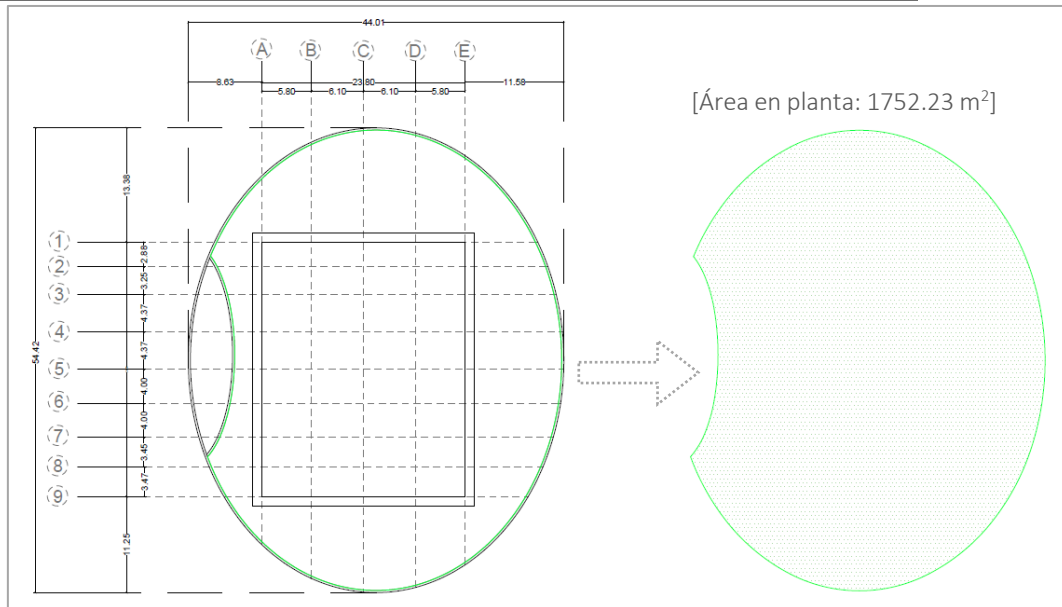


Como se puede apreciar en la figura 5 el techo del auditorio ya es utilizado como superficie de captación, dada la distribución del mismo y los desniveles que existen es necesaria la utilización de canaletas de concreto (impermeabilizadas) que conducen el agua hacia los ductos interiores de PVC los cuales cuentan con rejillas gruesas para evitar el paso de sólidos de gran tamaño, sin embargo es recomendable utilizar rejillas aún más finas, de acuerdo con la información obtenida del personal de la AMC estas rejillas no son limpiadas periódicamente ni existe un filtro que descarte el agua de las primeras lluvias. Este inmueble tiene la ventaja de que no existe un árbol que sobrepase la altura de su azotea por lo cual ésta se aprecia sensiblemente limpia.

El agua una vez captada es conducida por ductos de PVC embebidos en los muros del auditorio, por lo cual es imposible modificarlos o acceder a ellos sin tener que destruir o dañar partes del inmueble, que descargan directamente a la cisterna interior de agua de lluvia, el agua que rebosa de ésta cisterna es descargada en la cisterna exterior de la cual el agua es tomada directamente para riego de jardineras y ciertas áreas verdes, el agua de la cisterna interior también puede ser tomada directamente aunque eso raramente sucede y con ella sólo se riega una jardinera en el interior del auditorio. Como se aprecia en el esquema no existe un proceso que permita tener un consumo humano del agua de lluvia captada.

Sabiendo que el auditorio Galileo Galilei de la AMC cuenta ya con varios elementos de un SCALL el siguiente paso fue la determinación del área útil de captación, esto se determinó a partir de los planos originales del Arq. Felipe Leal Fernández encargado del diseño del inmueble, la figura 6 muestra el modelo creado para la determinación del área, el detalle de la planta y el plano original de la azotea se muestran en el anexo 1.

FIGURA 6 DETERMINACIÓN DEL ÁREA ÚTIL DE CAPTACIÓN DEL AUDITORIO GALILEO GALILEI



Fuente: Elaboración propia a partir de los planos originales del Arq. Felipe Leal Fernández.

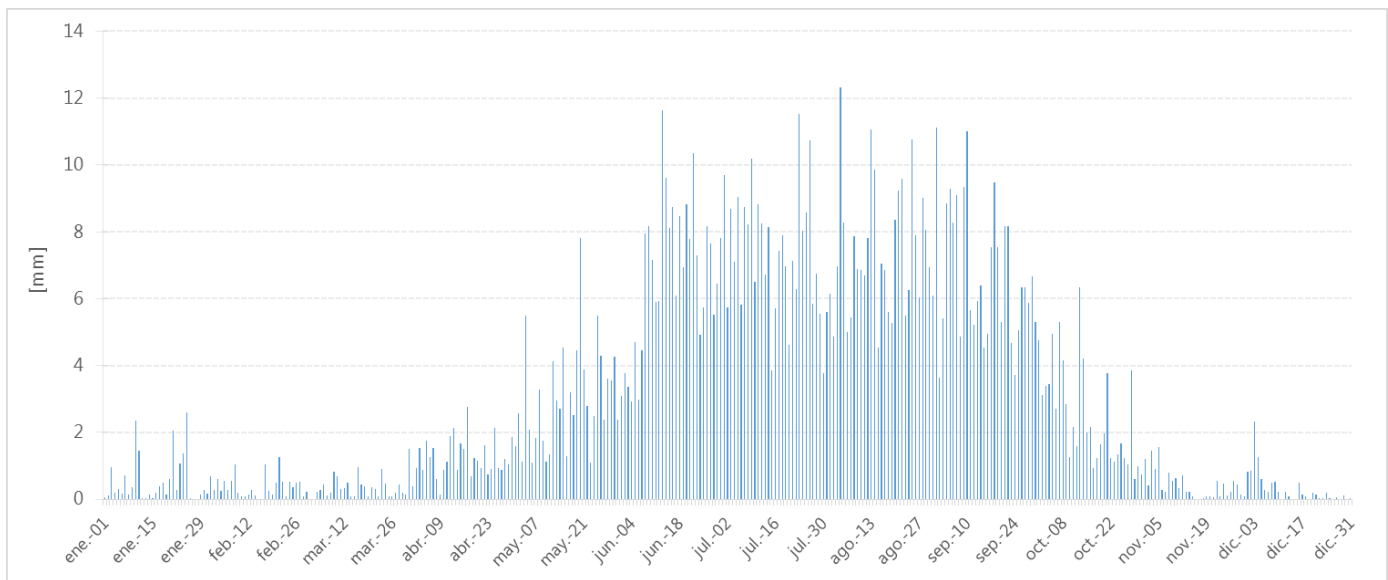
Como se muestra en la figura 6 el área de la azotea del auditorio Galileo Galilei es de 1752.23 m², su superficie está cubierta mayoritariamente por láminas metálicas y el resto es una losa de concreto

impermeabilizada, por ello se decidió asignar un coeficiente de escurrimiento de 0.8 para todo el conjunto.

Lo siguiente fue determinar la precipitación de la zona, para ello se requirió utilizar información pública disponible de estaciones climatológicas. Generalmente se supone que la lluvia se distribuye de forma uniforme, pero en realidad la intensidad de lluvia se mide en forma puntual, y por ende sólo puede ser representativa para áreas pequeñas. Como se mostró en el mapa 4 en el apartado II.A.i Área de estudio la estación más cercana es la estación 09002 Ajusco, la cual se encuentra a poco más de 3.5 km de la AMC y a una altura de 2900 msnm, entre esta estación y la AMC existe un desnivel de aproximadamente 250 m. Dada la cercanía de esta estación con el área de estudio se decidió utilizar directamente la información de sus registros.

La estación Ajusco cuenta con más de 25 años de registros y actualmente está fuera de operación, los registros de precipitación de esta estación se obtuvieron a través del CLICOM⁷ del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). La figura 7 muestra la precipitación media anual calculada con datos de la estación Ajusco. En un año tipo precipitan aproximadamente 1130 litros de agua en cada metro cuadrado de superficie dentro del área de influencia de esta estación.

FIGURA 7 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL EN LA ESTACIÓN 09002 AJUSCO



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos climáticos diarios del CLICOM del SMN a través de su plataforma web del CICESE (<http://clicom-mex.cicese.mx>)

⁷ CLICOM es un sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas, CLICOM significa CLImate COMputing project.

III. B. Determinación de oferta y demanda de agua

La **oferta de agua** es la cantidad de agua que es posible obtener dada una superficie de captación de área definida y la precipitación con la que se decida modelar, en este caso un año promedio de lluvia, su cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$O_i = \frac{(Pp_i)(C_E)(A_C)}{1000}$$

O_i : Volumen de agua ofertado por la superficie de captación en el día i en m^3

Pp_i : Precipitación pluvial promedio del día i en mm

C_E : Coeficiente de escurrimiento adimensional

A_C : Tamaño del área de captación en m^2

Todos estos datos son conocidos, el área de captación es de $1752.23 m^2$, el coeficiente de escurrimiento se fijó en 0.8, y los datos diarios de precipitación son conocidos, de manera tal que anualmente el techo del auditorio Galileo Galilei puede ofertar aproximadamente $1583 m^3$ de agua.

La **demanda de agua** es la cantidad requerida por los usuarios y visitantes de la AMC para poder realizar sus actividades sin ningún impedimento (bebida, preparación de alimentos, uso sanitario, limpieza y riego), dada la naturaleza del inmueble esta demanda no es constante a lo largo del año, sin embargo, es posible modelar un año tipo con los datos proporcionados por el coordinador operativo de esta institución de la siguiente manera:

Como se mencionó anteriormente en una semana normal de labores se consumen $16 m^3$ de agua.

En la AMC se laboran 46 semanas al año dado que existen 3 semanas de descanso entre julio y agosto y 3 semanas de descanso entre enero y diciembre de cada año.

Se labora de lunes a viernes en un horario de oficina normal, el sábado medio día y se descansa los domingos. Por tanto se asigna un consumo de $2.8 m^3$ de lunes a viernes de trabajo normal, un consumo de $1.4 m^3$ para los días sábados y un consumo de $0.6 m^3$ para los domingos y días de descanso vacacional.

Los 12 eventos que se pueden llegar a albergar la AMC se distribuyen de manera más o menos uniforme a lo largo del año y en general tienen una duración de 1 a 2 días, durante los cuales se consumen en promedio $64 m^3$ de agua.

Se asignó un evento para cada uno de los 12 meses del año, todos ellos se supusieron con una duración de 2 días para suponer un escenario de demanda máxima.

A partir de estos datos y consideraciones se determinó la oferta y demanda de agua en la AMC.

III. C. Determinación de la confiabilidad del sistema

Los datos brutos de oferta y demanda de agua no sirven para conocer el comportamiento operativo de un SCALL, para ello es necesario tomar en cuenta que el tanque de almacenamiento funciona como un regulador entre la oferta y la demanda. Este elemento normalmente es dimensionado para que los volúmenes excedentes ofertados en tiempo de precipitación abundante puedan ser almacenados para ser usados en tiempo de estiaje.

En el caso particular de la AMC el almacenamiento ya está definido, en primera instancia la cisterna pluvial está limitada a 42 m³, lo que resulta en un volumen muy pequeño dadas las necesidades de la AMC pues supondría una reserva de menos de 3 semanas de actividades regulares, esto suponiendo que no hay entradas ni salidas del sistema durante ese periodo.

Dados estos inconvenientes lo que se propone en este trabajo es la implementación de un sistema que extraiga el agua de la cisterna interior de agua pluvial, la haga pasar por una planta de potabilización y posteriormente la descargue en la cisterna principal del auditorio, a partir de la cual el agua se seguirá distribuyendo de la misma manera que se ha estado haciendo desde la inauguración de este inmueble en 2008. De esta manera se pasa de un volumen de almacenamiento de 42 m³ a uno de 130 m³ lo que permite aumentar la capacidad de regulación en gran manera.

En general existen tres tipos de modelos de determinación del tamaño del almacenamiento: los de período crítico, los de Moran y los modelos basados en comportamiento (McMahon & Mein, 1978). De acuerdo con Fewkes & Butler (2000), los métodos de período crítico identifican y usan secuencias de flujos cuando la demanda excede la oferta para determinar la capacidad de almacenamiento. Los métodos de Moran son un desarrollo de la teoría del almacenamiento de Moran, basados en la teoría de colas y consisten en un sistema de ecuaciones simultáneas que relacionan la capacidad del almacenamiento, la demanda y la oferta. Los modelos de comportamiento simulan el funcionamiento del tanque con respecto al tiempo mediante el seguimiento de flujos de masa simulados a través de un algoritmo que describe el funcionamiento del reservorio.

En este caso se utilizarán dos métodos basados en comportamiento conocidos como YAS y YBS por sus siglas en inglés (Yield After Spillage o aprovechamiento después de derrame y Yield Before Spillage o aprovechamiento antes de derrame, respectivamente). Estos métodos fueron desarrollados por el *California Water Resources Center* de la Universidad de California en Davis y fueron publicados como parte de un estudio sobre la factibilidad de los SCALL en ese estado (Jenkins & Pearson, 1978).

La regla operativa del método YAS asigna el aprovechamiento como el volumen de agua de lluvia en almacenamiento desde el intervalo de tiempo precedente o la demanda en el intervalo de tiempo actual, lo que sea menor. El escurrimiento del agua de lluvia en el intervalo de tiempo actual se añade al volumen de agua de lluvia en almacenamiento desde el intervalo de tiempo precedente, con cualquier exceso de derramamiento a través del desbordamiento, y el rendimiento se resta. Este método supone que el agua puede derramarse del almacenamiento antes de ser utilizada.

La regla operativa del método YBS asigna el aprovechamiento como el volumen de agua de lluvia en almacenamiento desde el intervalo de tiempo anterior más el escurrimiento en el intervalo actual o la demanda actual, el que sea menor. El escurrimiento del agua de lluvia en el intervalo de tiempo actual se añade entonces al volumen del agua de lluvia en almacenamiento desde el intervalo de tiempo anterior antes de restar el rendimiento y permitir que cualquier exceso derrame a través del desbordamiento. Este método supone que el agua es utilizada antes de que el almacenamiento se encuentre lleno.

A continuación se muestran las ecuaciones utilizadas para modelar el comportamiento del tanque con ambos métodos.

$$Y_t = \min \left\{ \begin{array}{l} D_t \\ V_{t-1} + \theta Q_t \end{array} \right.$$

$$V_t = \min \left\{ \begin{array}{l} (V_{t-1} + Q_t - \theta Y_t) - (1 - \theta) Y_t \\ S - (1 - \theta) Y_t \end{array} \right.$$

Donde:

Y_t : Volumen de agua aprovechado del almacenamiento en el intervalo de tiempo t en m^3

D_t : Demanda de agua durante el intervalo de tiempo t en m^3

V_t, V_{t-1} : Volumen de agua almacenado en el tanque durante el intervalo de tiempo t y $t - 1$ en m^3

Q_t : Escurrimiento pluvial durante el intervalo de tiempo t en m^3

θ : Parámetro adimensional de método; si $\theta = 0 \rightarrow$ YAS y si $\theta = 1 \rightarrow$ YBS

S : Capacidad del tanque de almacenamiento en m^3

El rendimiento del SCALL se describe por su eficiencia de ahorro de agua E_T . La eficiencia de ahorro de agua es una medida de cuánta agua de lluvia captada es aprovechada con respecto a la cantidad demanda de los usuarios.

$$E_T = \frac{\sum_{t=1}^T Y_t}{\sum_{t=1}^T D_t} \times 100$$

Donde T es el tiempo total de análisis considerado.

Para el análisis de la cisterna principal del auditorio Galileo Galilei se consideraron intervalos de tiempo t iguales a 1 día y un tiempo total de análisis T de 5 años para ambos métodos YAS y YBS.

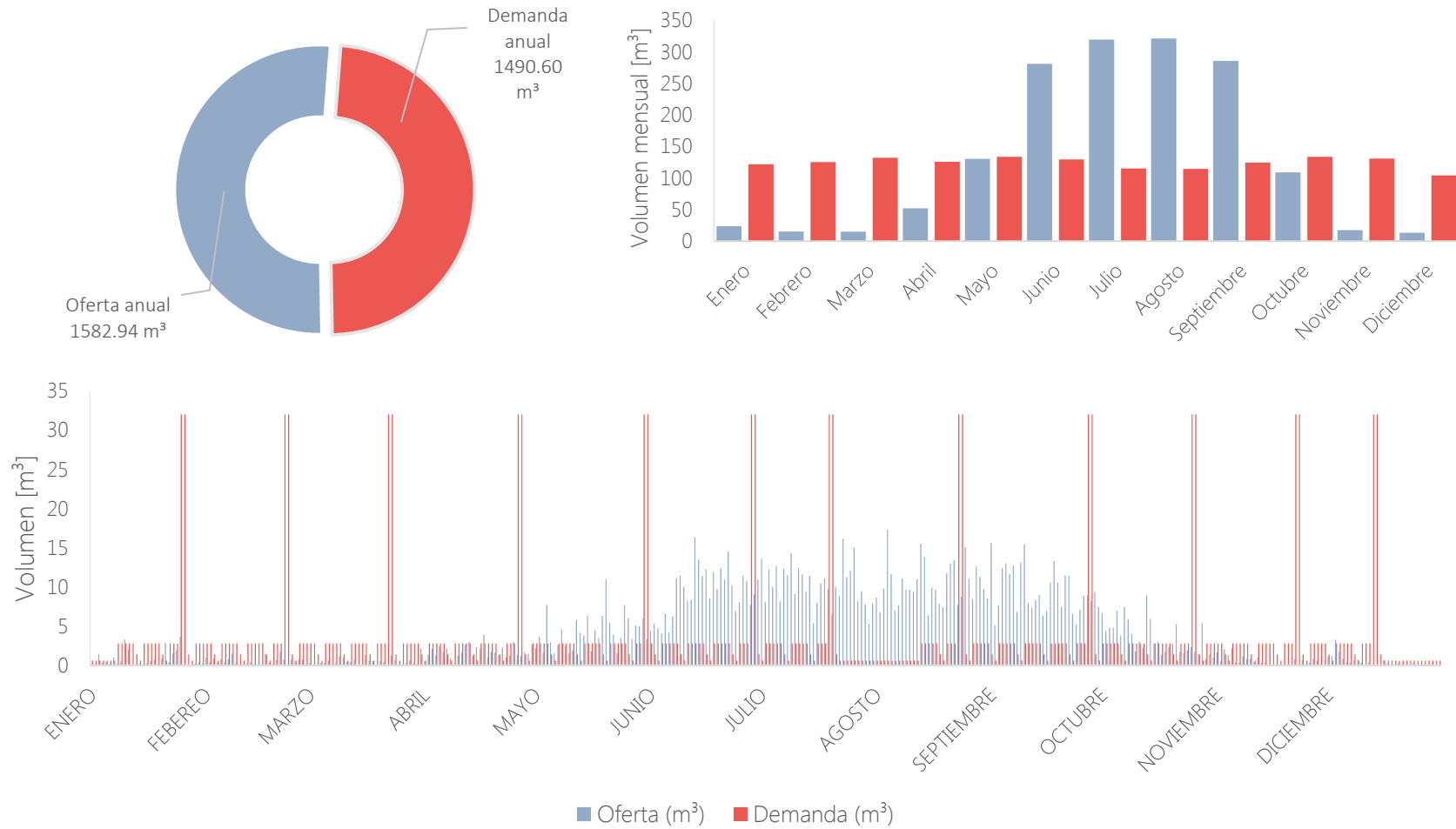
IV. Análisis de resultados

IV. A. Oferta y demanda de agua

A partir de los datos de precipitación de la estación 09002 Ajusco obtenida del CLICOM del SMN y los datos de consumo proporcionados por la Coordinación Operativa de la AMC y las consideraciones planteadas en la metodología se pudo modelar un año de oferta y demanda de agua promedio, en la figura 8 se muestra la distribución de los volúmenes ofertados y demandados de manera anual, mensual y diaria en la AMC.

En esta figura se puede apreciar que la oferta anual supera a la demanda por poco más de 90 m³, se observa también que en términos mensuales la demanda es prácticamente constante durante el año y que durante el período de mayo a octubre la oferta prácticamente iguala o supera a la demanda, en última instancia es notorio que a nivel diario la oferta no es capaz de satisfacer la demanda por periodos extendidos durante el año y que los días en que la AMC hospeda algún evento se requeriría hacer uso del agua almacenada en las cisternas o en su defecto hacer uso de una fuente alterna de abastecimiento.

FIGURA 8 ANÁLISIS DE LOS VOLÚMENES OFERTADOS Y DEMANDADOS DE MANERA ANUAL, MENSUAL Y DIARIA



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos climáticos diarios del CLICOM del SMN y la información proporcionada por el Sr. Rodolfo Rojas Cruz, Coordinador Operativo de la AMC.

IV. B. Confiabilidad del sistema

A partir del análisis durante un periodo de 5 años con datos diarios con los métodos YAS y YBS se obtuvieron los siguientes resultados:

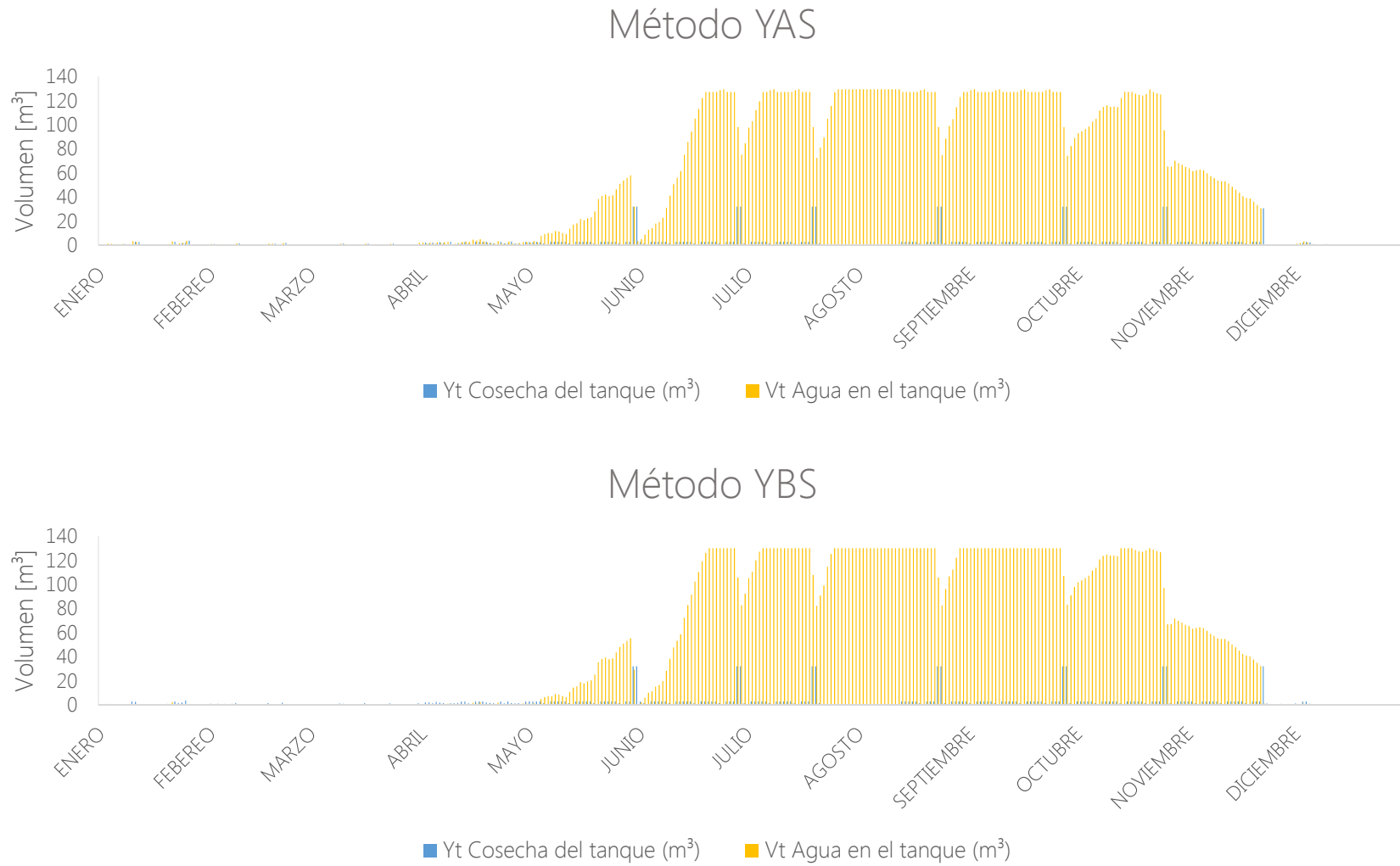
- Se obtuvo una confiabilidad superior al 70% para ambos métodos durante el periodo analizado, 72.9 y 73.8% para el método YAS y YBS respectivamente.
- Se determinó que existe una invariabilidad en el comportamiento anual del sistema, debido a la regularidad de los eventos de alto consumo ya que estos impiden que los volúmenes captados se almacenen de un año hacia a otro, por ello se concluyó que no es necesario analizar un periodo mayor a un año.
- Se observa que el sistema es prácticamente infalible a partir de los primeros días de mayo y hasta los últimos días del mes de noviembre.
- En el caso de este sistema ambos métodos resultaron ser muy aproximados, pues el método YAS supone que es posible el aprovechamiento de aproximadamente 934 m³ de agua anualmente, mientras que el método YBS estima 939 m³ de agua aproximadamente, lo que coincide con lo reportado en la literatura pues el método YAS es considerado más conservador que el método YBS.

La figura 9 muestra el comportamiento anual del volumen de agua almacenada en el tanque y aquella que es sustraída del mismo para ser consumida de acuerdo con el método YAS y YBS durante todo un año, en ella se aprecia la gran similitud que existe entre ambos métodos y lo marcado de la temporada de lluvias donde el tanque alcanza en varias ocasiones su capacidad máxima, en ella también se observa que el tanque mantiene un volumen almacenado bastante grande hasta finales de noviembre.

La figura 10 muestra en mayor detalle los volúmenes de agua en el tanque y los aprovechados del mismo para los periodos de enero a abril para ambos métodos, en ella también se muestran la línea de demanda de agua para ese mismo periodo. En esta figura se hacen evidentes las diferencias entre las suposiciones de las cuales parten estos dos procedimientos, en el método YAS se supone que el agua que precipita en el intervalo de tiempo t no puede ser usada para cubrir las necesidades de ese mismo día y en consecuencia ha de ser almacenada, por ello el volumen de agua almacenada en el tanque durante este periodo es mayor que el agua extraída. En el método YBS se supone que el agua que precipita en el intervalo de tiempo t puede ser utilizada para cubrir las necesidades de ese mismo intervalo, es por ello que la cantidad cosechada del tanque durante este periodo es mucho mayor que la almacenada.

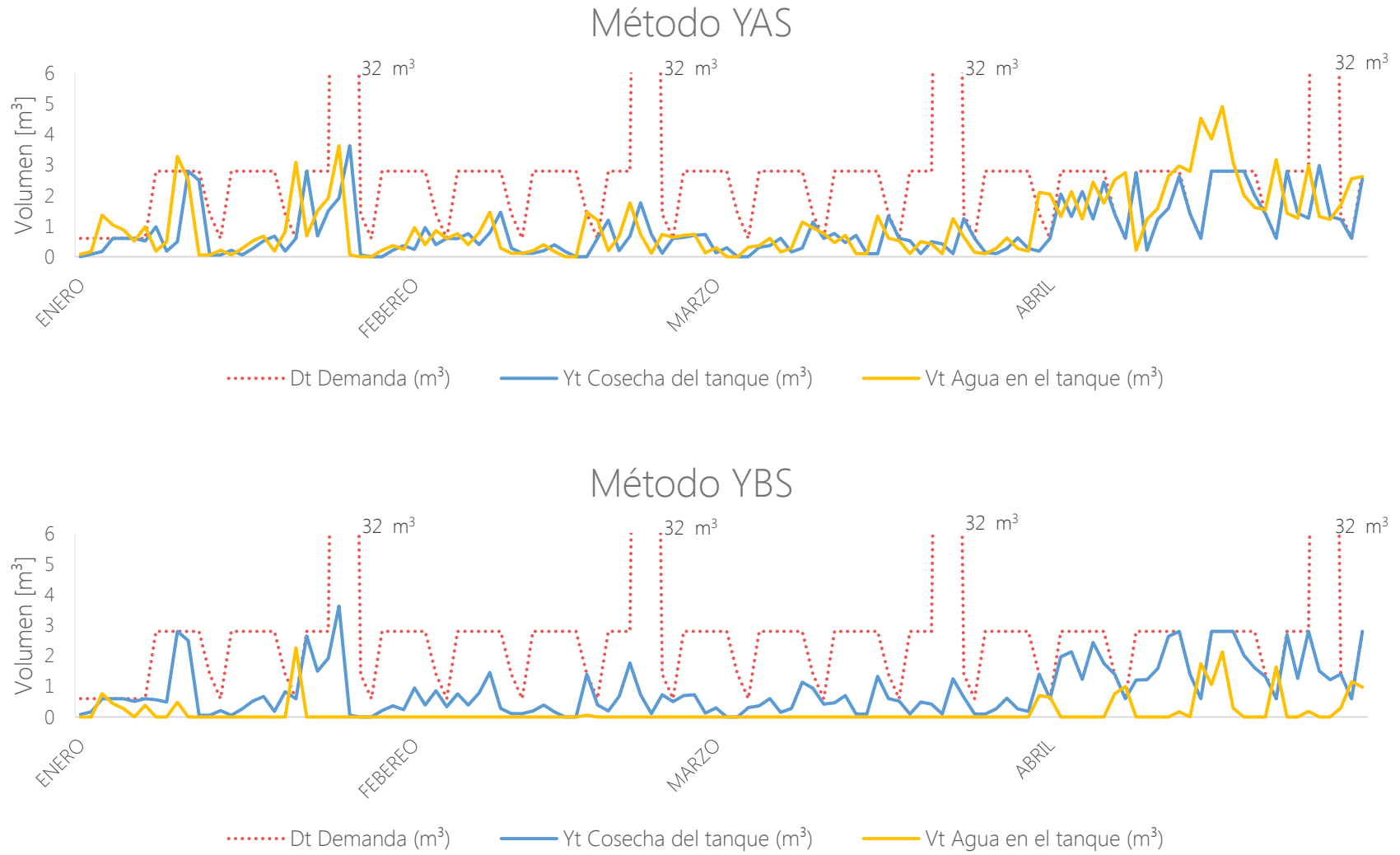
Con cualquiera de las dos metodologías queda claro que en el periodo de enero a abril no es posible cubrir la demanda de agua por parte de los usuarios con agua de lluvia captada.

FIGURA 9 COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ANUAL DE LOS VOLÚMENES ALMACENADOS Y SUSTRÁIDOS DEL TANQUE



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 10 COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS VOLÚMENES ALMACENADOS Y SUSTRÁIDOS DEL TANQUE DE ENERO A ABRIL



Fuente: Elaboración propia.

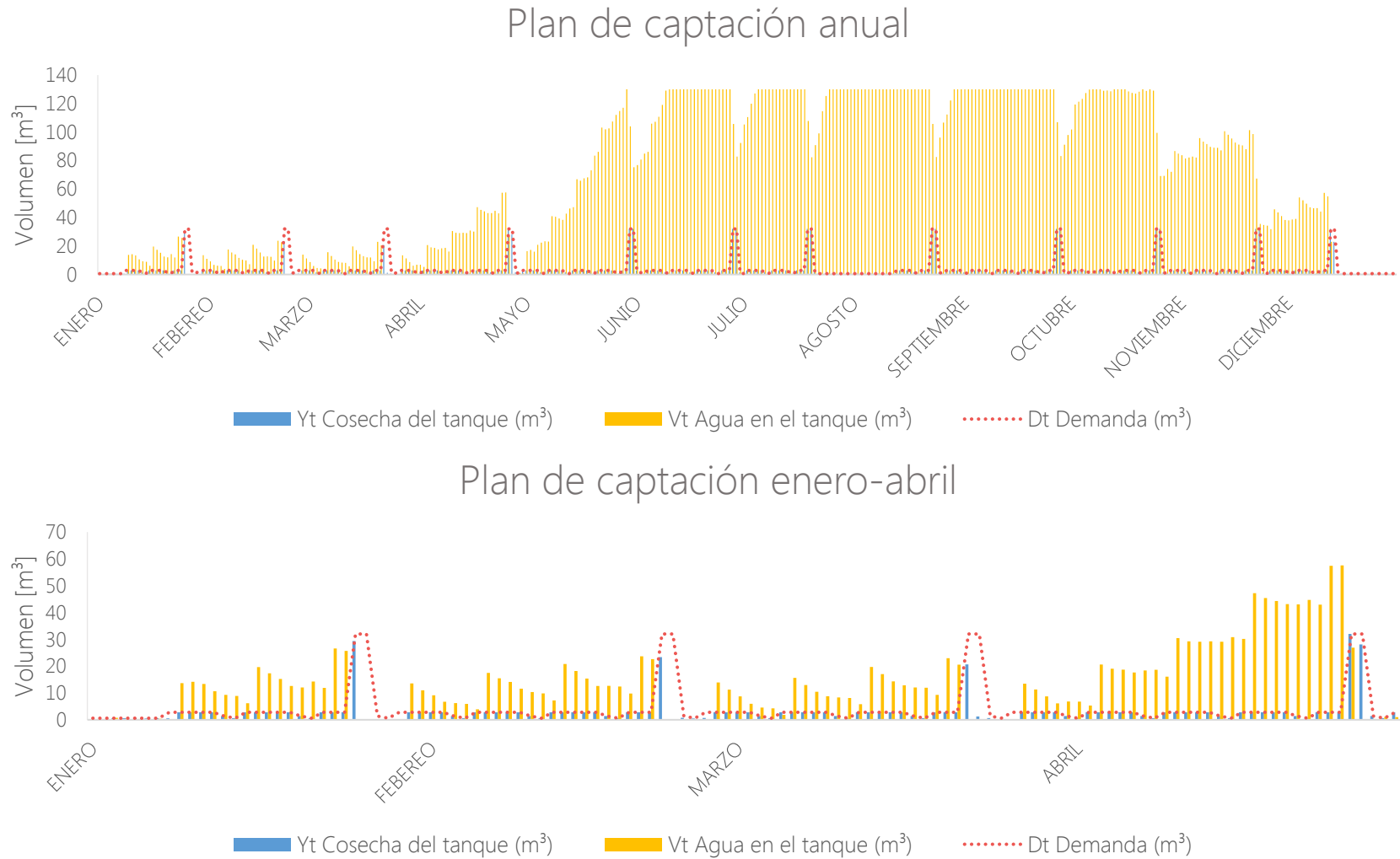
IV. C. Plan de captación

A partir de los resultados obtenidos y la información recabada se propone el siguiente plan de captación de 5 puntos:

1. Dado la extensa área y la infraestructura con la cuenta el auditorio Galileo Galilei de la AMC se propone que la captación de agua pluvial sólo se realice en ese inmueble, para ello es necesario establecer un programa de limpieza periódica del techo, un mejoramiento de las trampas de sólidos en canaletas y tuberías y que se establezca un programa de lavado anual de las cisternas de agua pluvial.
2. Se propone la implementación de un sistema de bombeo que extraiga el agua de la cisterna interior de agua pluvial, la haga pasar por una planta de potabilización y posteriormente la descargue en la cisterna principal del auditorio. Este sistema deberá de estar equipado con sensores de nivel para su arranque y paro de manera automática para evitar que el agua pluvial rebose de la cisterna, para que de esta manera se pueda asegurar que el sistema funciona bajo el parámetro de aprovechamiento antes de derrame del método YBS.
3. Para aumentar la confiabilidad del sistema se deberá de distribuir el agua desde la cisterna de agua pluvial hacia el resto de la AMC de la misma manera que se ha estado haciendo hasta ahora con la diferencia de que durante el periodo de alta precipitación, mayo a octubre, se deberá de abastecer de manera constante al resto de las cisternas y depósitos elevados tratando de mantenerlos a su máxima capacidad. De esta manera podrán aprovecharse aproximadamente 55 m³ extras de almacenamiento de agua.
4. Dado el prolongado tiempo que puede llegar a pasar almacenada el agua de lluvia ya potabilizada se propone establecer un programa de adición y control de cloro en cisternas y depósitos elevados de toda la AMC.
5. Como la confiabilidad del sistema por sí sólo no es del 100% se deberá seguir recurriendo a vendedores de agua, por lo que se propone seguir utilizando los 16 m³ de agua correspondientes al programa delegacional *Provisión Emergente de Agua Potable*, por ser un derecho de los habitantes de la delegación y por tener un menor costo. De esta manera se obtendría una confiabilidad en el sistema de 93%.

La figura 11 muestra el comportamiento del volumen de agua almacenada en el tanque y aquella que es sustraída del mismo para ser consumida de acuerdo con las consideraciones realizadas en este plan de captación (método YBS y fuente alterna de abastecimiento). En ella se muestra que el sistema no es capaz de abastecer toda el agua requerida para los eventos de alto consumo si estos tienen una duración de más de un día.

FIGURA 11 COMPORTAMIENTO DEL AGUA COSECHADA Y ALMACENADA DEL TANQUE COMPARADA CON LA DEMANDA DE ACUERDO CON EL PLAN DE CAPTACIÓN



IV. D. Comparación de costos

De acuerdo con los puntos planteados en el apartado anterior los costos del metro cúbico de agua obtenida a partir del plan de captación se compondrán de la siguiente manera:

- o Agua obtenida a partir del programa delegacional *Provisión Emergente de Agua Potable*, con un costo de \$8.75/m³ y un volumen anual de 528 m³.
- o Agua obtenida de vendedores privados, necesaria para completar los faltantes de los primeros meses del año con un costo de \$62.50/m³ y un volumen máximo anual de 154 m³.
- o Agua obtenida de la captación de agua de lluvia y que puede ser aprovechada con un volumen máximo anual de 939 m³.

El costo del agua de lluvia que puede ser aprovechado se compone principalmente por el costo debido a la instalación del sistema de bombeo y potabilización así como el mantenimiento del mismo, esto debido a que no se proponen modificaciones en la infraestructura de la AMC y a que los programas de limpieza y adición de cloro deberán ser absorbidos como actividades regulares de mantenimiento por el personal de la AMC.

Para estimar el costo del sistema de potabilización y bombeo se partió del costo real de una planta piloto de potabilización de agua de lluvia adquirida y operada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM como parte de este proyecto. Esta planta fue operada durante un período de 10 semanas con agua recolectada directamente de la cisterna interior de agua pluvial, el proceso fue monitoreado y probado para comprobar su eficacia para potabilizar el agua captada en el AMC. El costo de compra, instalación, puesta en marcha y operación de esta planta piloto fue de \$7500 aproximadamente y se estima que escalar este proceso a las dimensiones requeridas por el sistema propuesto en la AMC sería, holgadamente, de \$55 000 por concepto de compra, instalación y puesta en marcha del sistema. De la misma manera el mantenimiento anual se estima en \$5000 por el concepto de cambio de filtros y compra de insumos. Conservadoramente se estima que una planta de este tipo tendría una vida útil de 10 años. Por tanto se calcula que el costo unitario del agua de lluvia potabilizada será de aproximadamente \$11/m³.

Por lo tanto el costo promedio del metro cúbico de agua obtenido mediante el plan de captación será de \$15.60/m³, mientras que el costo actual promedio que paga la AMC para abastecerse de agua es de \$34.65/m³, lo que significaría una reducción de costos de más del 50%.

V. Conclusiones y recomendaciones

A la luz de los resultados obtenidos y del análisis de los mismos se obtuvieron las siguientes conclusiones:

En un primer análisis sobre la oferta y demanda de agua en la Academia Mexicana de Ciencias, basado en la información pública de precipitación para la oferta y los datos internos de consumo proporcionados por la Coordinación Operativa de la AMC para la demanda, se puede concluir que:

- La oferta de agua de un año promedio es ligeramente mayor que la demanda de agua que se tiene en un periodo anual normal de actividades.
- Aunque el agua ofertada por el techo del auditorio Galileo Galilei (1583 m³) es superior al agua demandada (1463 m³) durante un periodo anual promedio, el agua de lluvia que puede aprovecharse en el mismo periodo, acorde al plan de captación, solamente es el 50% de la ofertada (780 m³). Esto debido al tamaño del almacenamiento y la distribución temporal de la lluvia.

Sobre la confiabilidad del SCALL de acuerdo con lo propuesto en el plan de captación previamente planteado se concluye que:

- Al utilizarse un sistema automatizado de bombeo en la cisterna se está trabajando bajo la regla operativa del método YBS, teniendo un aprovechamiento de agua antes de que el sistema de

almacenamiento se derrame, lo cual aumenta la confiabilidad en el sistema y disminuye el tiempo de trabajo necesario para abastecerse de agua en la AMC.

- Al seguir el plan de captación propuesto, en lugar de sólo aprovechar el agua de lluvia, se pasa de una confiabilidad de 74 a 93%, entendida como agua obtenida a partir del SCALL con respecto a la demanda total de agua.

Sobre la comparación entre los costos estimados de abastecerse de agua mediante el plan de captación propuesto y el método actual de abastecimiento se concluye que:

- Abastecerse de agua en la AMC a partir del plan propuesto significaría ahorros económicos muy importantes, si bien los costos estimados del plan de captación pueden ser una primera aproximación un tanto hosca los costos del método actual son ciertamente muy elevados.
- Si bien la inversión inicial requerida para llevar a cabo el plan propuesto resulta elevada, ésta es comparable con el costo anual del abastecimiento actual. De la misma manera debido a los ahorros que se tendrían con este método de abastecimiento ésta misma inversión podría recuperarse en los primeros dos a tres años de uso del sistema.
- El ahorro económico sería importante para la AMC, sin embargo, de seguir el plan propuesto también se ganaría en autonomía, comodidad, bienestar y ahorro de tiempo.

En respuesta a la hipótesis planteada en este trabajo se puede decir que de seguir el plan propuesto la AMC podría abastecerse de agua obtenida de un SCALL durante la mayor parte del año. De la misma manera se puede concluir que los objetivos planteados en este trabajo se han cumplido pues se ha estimado el potencial de aprovechamiento de agua de lluvia de la AMC realizando un análisis de oferta y demanda de agua, un análisis de confiabilidad y una comparación de costos.

A partir de la experiencia adquirida durante la elaboración de este trabajo se emiten las siguientes recomendaciones:

- La captación de agua de lluvia debe de ser más difundida y estudiada en México, esta metodología debería de ser cofinanciada por los usuarios y las autoridades encargadas del servicio de abastecimiento de agua de acuerdo con lo establecido en documentos oficiales como el Programa Nacional Hídrico 2013-2018 que dentro de su estrategia *3.1 Incrementar la cobertura de los servicios de agua potable y alcantarillado*, establece el fomento a las fuentes de agua alternativa y el incremento de las coberturas privilegiando a la población vulnerable o el caso particular del Programa de Desarrollo de la Delegación Tlalpan 2015-2018 el cual establece dentro de su quinto eje de desarrollo *5. Promover la garantía del derecho al agua y mejora de los servicios urbanos* establecer un programa domiciliario de captación de agua de lluvia.
- Se deben de generar estándares y normas mexicanas para la correcta utilización de esta técnica, basados en la experiencia internacional y casos de estudio exitosos dentro del país.

REFERENCIAS

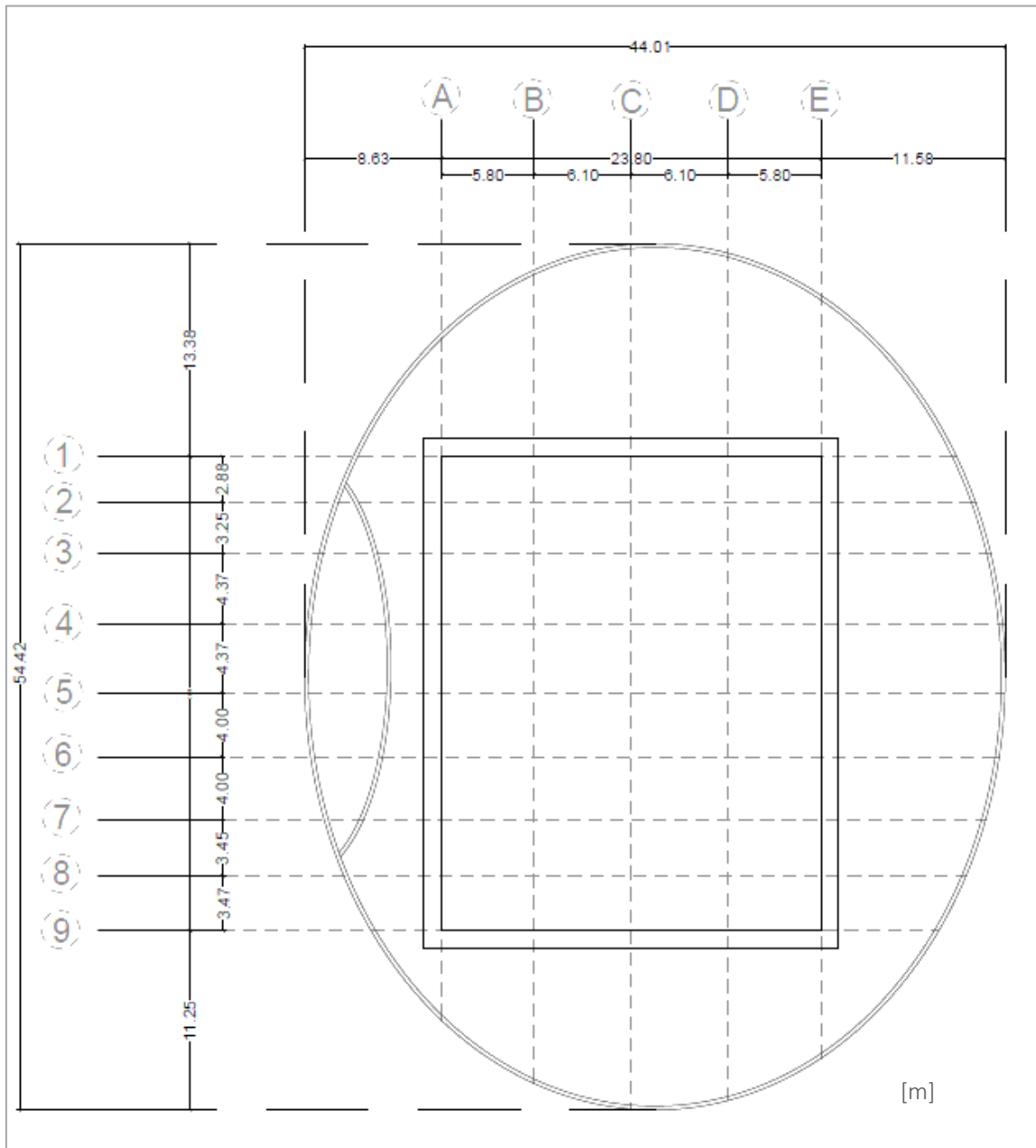
- Aparicio Mijares, F. (1989). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México, D.F.: LIMUSA.
- Ballén Suárez, J. A., Galarza García, M. Á., & Ortiz Mosquera, R. O. (2006). *Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua de lluvia*. João Pessoa: Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua.
- Banco Mundial. (2013). *Agua urbana en el Valle de México: ¿un camino verde para mañana?* México: Banco Mundial.
- Boltivink, J. (06 de Noviembre de 2009). Economía moral, Agua y pobreza. *La jornada*.
- Breña Puyol, A. F., & Breña Naranjo, J. A. (2009). Problemática del recurso agua en grandes ciudades: zona metropolitana del valle de México. *Contactos*(74), 10-18.
- Carabias, J., & Landa, R. (2005). *Agua, medio ambiente y sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México*. México: UNAM, Colegio de México y Fundación Gonzalo Río Arronte.
- CDMX. (2016). *Programa Operativo Anual*. Ciudad de México.
- CONAGUA. (2009). *Estadísticas del Agua en la Región Hidrológico-Administrativa XIII*. Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México.
- CONAGUA. (2011). *Semblanza Histórica del Agua en México*. (Semarnat, Ed.) México D.F.: Coordinación General de Atención Institucional, Comunicación y Cultura del Agua.
- CONAGUA. (2014). *Atlas del Agua en México 2014*. México D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2014). *Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento*. México.
- CONAPO. (2004). *Indicadores socioeconómicos e índice de marginación 1990-2000*. México D.F.: Consejo Nacional de Población.
- CONAPO. (2011). *Índice de marginación por entidad federativa y municipio 2010*. México D.F.: Consejo Nacional de Población.
- de la Peña, J. A. (14 de Noviembre de 2002). La Casa Tlalpan: de la corrupción a la ciencia. *Crónica*.
- Ezcurra, E. (1996). *De las chinampas a la megalópolis. El medio ambiente en la cuenca de México*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Fayez, A., & A.W., A.-S. (2009). Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan. *Desalination, 243*, 195-207.

- Fewkes , A., & Butler, D. (2000). Simulating the performance of rainwater collection and reuse systems using behavioural models. *Building Services Engineering Research and Technology*, 21(2), 99-106.
- Foro Económico Mundial. (2015). *Global Risks 2015*. Genova: World Economic Forum.
- García de Miranda, E. (1988). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. México D.F.: Offset Larios S.A.
- Herrera Monroy, L. A. (2010). *Estudio de alternativas, para el uso sustentable del agua de lluvia*. México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional.
- HESRAT Asociados S.A. de C.V. (Diciembre de 2012). Factibilidad de la captación de agua de lluvia como política pública para la Ciudad de México. México D.F.
- Howard, G., & Bartram, J. (2003). *Domestic water quantity, service level and health*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.
- INAFED. (2010). *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México*. Recuperado el 27 de Septiembre de 2016, de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/>
- INEGI. (2008). *Cuaderno estadístico de la delegación Tlalpan*. Ciudad de México.
- INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica delegacional de los Estados Unidos Mexicanos*. Ciudad de México.
- INEGI. (2010). Censo de Población y Vivienda 2010. México, Distrito Federal, México. Recuperado el 20 de julio de 2016, de http://www.inegi.org.mx/lib/olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?#Regreso&c=
- INEGI. (2010). Marco Geoestadístico Nacional. D.F., México. Recuperado el 19 de Septiembre de 2014, de http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/M_Geoestadistico.aspx
- INEGI. (2016). *Encuesta Intercensal 2015*. Ciudad de México.
- Jenkins, D., & Pearson, F. (1978). *Feasibility of rainwater collection systems in California*. Davis.
- Kinkade-Levario, H. (2007). *Design for water, rainwater harvesting, stormwater catchment and alternate water reuse*. Canadá: New Society Publishers.
- Maderey Rascón, L. E., & Carrillo Rivera, J. (2005). *El recurso agua en México: Un análisis geográfico*. México D.F.: Instituto de Geografía, UNAM.
- McMahon, T., & Mein, R. (1978). Reservoir capacity and yield. *Developments in Water Science*.
- Mundo Agua y Saneamiento. (05 de Enero de 2015). *agua.org.mx*. Obtenido de <http://www.agua.org.mx/noticias/not-nacionales/33495-delegacion-de-tlalpan-y-sacmex-instalan-sistemas-de-captacion-de-agua-pluvial>
- OMM/UNESCO. (2012). *Glosario Hidrológico Internacional*. Ginebra, Suiza.

- ONU CDESC. (2003). *Observación general No. 15 El derecho al agua (artículos 11 y 12 del Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales)*.
- Organización Panamericana de la Salud y Grupo Colaborativo de Agua y Saneamiento. (Noviembre de 2002). Soluciones innovadoras para el suministro de agua en comunidades rurales dispersas de Honduras. *Análisis del Sector Agua Potable y Saneamiento de Honduras*. Perú: Biblos.
- Pacey, A., & Cullis, A. (1986). *Rainwater Harvesting: The Collection of Rainfall and Runoff in Rural Areas*. Londres: ITDG Publishing.
- SEDESOL. (2014). *Diagnóstico del Programa para el Desarrollo de Zonas Prioritarias*.
- SEDESOL-CONAPO-INEGI. (2008). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México*.
- SEDUVI. (13 de Agosto de 2010). Programa Delegacional de Desarrollo Urbano para la Delegación Tlalpan. *Gaceta Oficial del Distrito Federal*.
- Semarnat & CONAGUA. (2014). *Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento*. México, D.F.
- Semarnat. (2010). *Atlas Geográfico del Medio Ambiente y Recursos Naturales* (2010 ed.). México D.F.
- Seo, Y., Sun, Y. P., & Young-Oh, K. (2015). Potential Benefits from Sharing Rainwater Storages Depending on Characteristics in Demand. *MDPI Water*, 1013-1029.
- Sheinbaum Pardo, C. (2016). *Programa de desarrollo de la delegación Tlalpan 2015-2018*. Ciudad de México.
- Tlalpan. (12 de Enero de 2017). *tlalpan.gob.mx*. Obtenido de <http://www.tlalpan.gob.mx/noticias/2203201601.php>
- UNATSABAR. (2001). *Guía de diseño para captación del agua de lluvia*. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- UNESCO. (2006). *2º Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo, "El agua, una responsabilidad compartida"*. Recuperado el 30 de marzo de 2015, de <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/wwdr2-2006/>
- Zapata Peraza, R. L. (1985). Los Chultunes de la región serrana de Yucatán. *Cuadernos de arquitectura mesoamericana*, 17-24.

Anexo 1

ANEXO 1. 1 DETALLE DE LA PLANTA DEL AUDITORIO GALILEO GALILEI DE LA AMC



ANEXO 1.2 PLANO ISOMÉTRICO ORIGINAL DE LAS BAJAS DE AGUA PLUVIAL DEL AUDITORIO GALILEO GALLEI DE LA AMC

