



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS CARACTERÍSTICAS MÁS  
REPRESENTATIVAS DE CALIDAD DEL AGUA DE LLUVIA DURANTE UNA  
TORMENTA. CASO DE ESTUDIO VIS CASA UNAM”**

**T E S I N A**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA**

PRESENTA:

**ING. DULCE MARÍA CEJA REYES**

DIRECTOR DE TESINA: **M. I. CRISTIAN EMMANUEL GONZÁLEZ REYES**

Ciudad Universitaria, Cd.Mx.

Octubre de 2018

---

## *Agradecimientos*

---

*A mi madre*

*Por el amor y apoyo incondicional que me ha brindado  
siempre.*

*A mi hermano*

*Por soportar los desvelos y por el ánimo que me brindaste.*

*A Adrián*

*Por el amor, la comprensión, el apoyo y el ánimo que me  
has brindado.*

*A mi tutor, Doctor Enrique César Valdez*

*Por creer en mí, brindarme su consejo y apoyarme  
durante el periodo de tiempo que estuve en la  
especialidad.*

*Al equipo del Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y  
ambiental.*

*Por el espacio, por el aliento que me brindaron y por los  
conocimientos que compartieron conmigo y que fueron  
clave para poder realizar este trabajo.*

*Al CONACYT y al proyecto 255273 “C.A.P.A.  
Prototipo de “Vivienda Sustentable”*

*Por el apoyo económico, por la oportunidad que  
me brindaron al participar en este proyecto y  
poder desarrollar este trabajo de investigación.*





## INDICE DE CONTENIDO

1. Introducción.....	1
1.1 Hipótesis .....	2
1.2 Objetivo general.....	2
1.3 Objetivos particulares.....	2
1.4 Justificación .....	3
1.5 Alcances y limitaciones.....	10
1.6 VIS CASA UNAM.....	10
2. Análisis hidrológico de la zona de estudio.....	14
2.1 Fuentes de información .....	15
2.2 Registros y análisis de los datos pluviales .....	18
2.3 Análisis del potencial de aprovechamiento en la zona de estudio.....	23
3. Calidad del agua de lluvia.....	26
3.1 Características de la atmósfera en la zona de estudio.....	28
3.2 Interacción de la precipitación pluvial y la atmósfera .....	31
3.3 Normatividad .....	32
3.3.1 NOM-127-SSA-1994 .....	33
3.3.2 Organización Mundial de la Salud.....	35
3.4 Resultado de otros estudios de calidad del agua de lluvia .....	37
3.5 Determinación de los parámetros a muestrear.....	39
3.5.1 Rangos esperados.....	41
3.5.2 Tendencias esperadas.....	42
4. Descripción de equipos a utilizar .....	45
4.1 Muestreador secuencial de agua de lluvia .....	45
4.2 Muestreador manual .....	48
5. Programa de muestreo .....	49
5.1 Descripción del procedimiento.....	50
5.1.1 Revisión del pronóstico del tiempo.....	50
5.1.2 Limpieza del equipo.....	50
5.1.3 Revisión de los circuitos y baterías .....	50
5.1.4 Pared de protección .....	51

5.1.5	Recolección de muestras .....	51
5.1.6	Etiquetado.....	52
5.1.7	Transporte de las muestras.....	53
5.1.8	Caracterización .....	53
5.2	Etiquetado.....	57
5.3	Formatos.....	58
5.4	Cadena de custodia.....	60
6.	Análisis y discusión de resultados .....	61
6.1	Concordancia con los rangos y tendencias esperados .....	61
6.2	Tendencias encontradas .....	62
6.3	Comparación con lo establecido en la NOM-127-SSA-1994.....	64
7.	Conclusiones y recomendaciones .....	69
	Bibliografía .....	72
	Anexo I. Formatos de cadena de custodia para cada tormenta.....	75

## 1. Introducción

En el contexto de la escasez hídrica y el aumento de la población, la demanda de agua es cada vez mayor. Existen algunas opciones además del abastecimiento de agua a través de tubería que entregan los organismos operadores; una de ellas es el aprovechamiento pluvial, por ende, la calidad del agua pluvial juega un papel importante.

En este trabajo se aborda el tema de la calidad del agua de lluvia durante un evento. A diferencia de otros documentos existentes relativos al tema de caracterización de agua de lluvia con fines de aprovechamiento, el muestreo en este caso se consideró de forma secuencial, lo anterior permitirá identificar patrones en la evolución de las características de calidad del agua de lluvia y de esta forma identificar el volumen o lámina de lluvia potencialmente aprovechable.

Al inicio de este trabajo se presenta la hipótesis bajo la cual se realiza todo el análisis; se definen los objetivos para llegar a confirmar o refutar dicha hipótesis y se declaran los alcances y limitaciones de este trabajo. Para entender la necesidad de agua en el país y en la Ciudad de México, se exponen algunos datos duros con respecto a la disponibilidad de agua en la zona de estudio y su comparativa con otras regiones de México.

En el capítulo dos se hace un análisis de los indicadores hidrológicos de la zona de estudio, a partir de la consulta de diferentes fuentes de información, lo que permite identificar el cómo llueve y con qué intensidad.

Para llegar a una conclusión en este trabajo es necesario conocer la relación de la calidad del aire con el contenido de contaminantes en el agua precipitada. En el capítulo 3 se aborda la calidad de la atmósfera en la zona de estudio, además se exponen los resultados encontrados en algunas fuentes que ya han elaborado estudios parecidos y además un recuento de las normas nacionales aplicables, lo

que permitió definir los parámetros más representativos para la caracterización del agua pluvial.

Para lograr obtener las muestras, se usó un equipo de muestreo secuencial de agua de lluvia que permitió el seccionamiento de cada evento. En el capítulo 4 se describe el funcionamiento del dispositivo utilizado.

Previo al muestreo, fue necesario contar con un plan que permitió saber cómo, cuándo y qué hacer antes, durante y después del muestreo; esto se describe en el capítulo 5, en el que también se muestran los formatos diseñados para realizar y registrar los resultados del muestreo. Se describen los procedimientos que se realizaron en el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (LISA) para la caracterización del agua.

Por último, en el capítulo 6, se presentan los rangos de valores obtenidos del muestreo y las tendencias encontrados, en comparación con lo establecido en las normas aplicables en México y con los estudios realizados por otros investigadores.

## 1.1 Hipótesis

Algunos parámetros representativos de la calidad del agua de lluvia evolucionan a lo largo de una tormenta.

## 1.2 Objetivo general

Analizar la variación de las características de calidad del agua de lluvia más representativas durante una tormenta, a partir del muestreo secuencial y posterior caracterización de varios eventos.

## 1.3 Objetivos particulares

- Definir el comportamiento de la precipitación pluvial en la zona de estudio.

- Dadas las condiciones de la zona de estudio, estimar las características de calidad del agua que se esperan durante el muestreo.
- Describir el dispositivo para el muestreo secuencial de agua de lluvia.
- Con base en un análisis de lo establecido en la bibliografía especializada y la normatividad, establecer los parámetros que permitan identificar las tendencias en la variación de la calidad del agua de lluvia durante una tormenta.
- Elaborar un programa de muestreo.
- Analizar los resultados obtenidos.
- Identificar las tendencias observadas durante el análisis de resultados.

## 1.4 Justificación

México cuenta con 32 entidades federativas, con una población total de 119,938,473 personas (INEGI, INEGI censos y conteo de población y vivienda, 2015). De esta población, el 56.97% se concentra en las zonas metropolitanas. Proyecciones de crecimiento poblacional indican que para 2030 habrá una población de 137.5 millones de habitantes, como lo muestra la figura 1.1 (CONAGUA, Estadísticas del Agua en México, 2017).

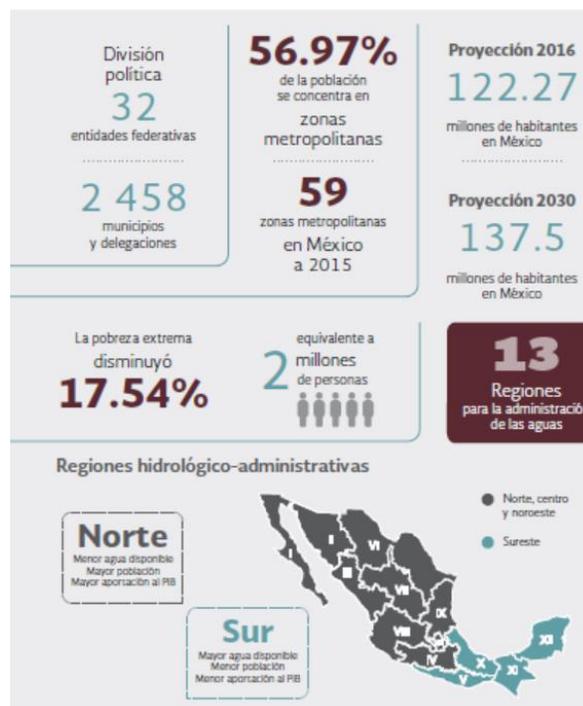


FIGURA 1.1 Población en México. Fuente: Estadísticas del Agua en México CONAGUA 2017

Como se observa en la figura 1.2, la población ha ido creciendo de manera alarmante desde el año 1950 y las estadísticas indican que seguirá creciendo en los próximos años, hasta llegar a 151 millones para el año 2050 (Guerrero V. M., 2014). Tan solo en la Ciudad de México (CDMX) habitan 8,918,653 personas (INEGI, Cuéntame INEGI, 2015). Al observar y realizar un análisis superficial de las estadísticas, se puede concluir que el aumento de la población también implica el aumento en la demanda de servicios; esto incluye el agua potable, lo que puede ocasionar grandes retos futuros para el abastecimiento de la misma (INEGI, INEGI censos y conteo de población y vivienda, 2015).

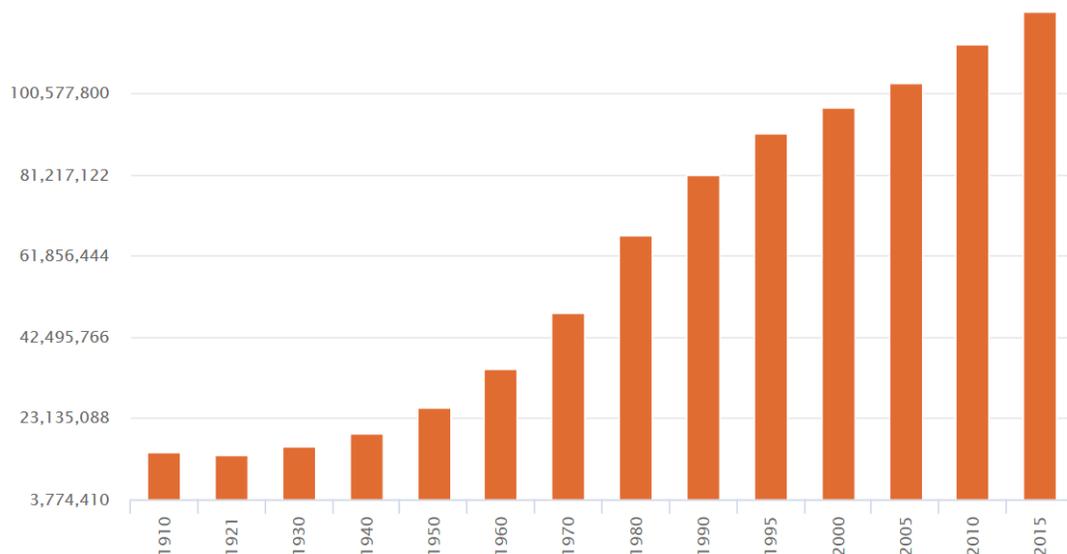


FIGURA 1.2 Crecimiento poblacional en México. Fuente: INEGI Censos y conteos de población y vivienda. Encuesta intercensal 2015.

En México, la provisión de agua potable está a cargo de los municipios. Se estima que de cada 100 litros de agua utilizados por la población, 15 son empleados en abastecimiento público; de estos 15 litros, 6 provienen de aguas superficiales y 9 de aguas subterráneas (CONAGUA, NUMERAGUA, 2016).

Del agua que se utiliza en la CDMX el 71% proviene de aguas subterráneas, 26.5% del río Lerma y Cutzamala y 2.5% del Río Magdalena; lo que indica que la principal fuente de abastecimiento son los mantos acuíferos. La excesiva demanda de agua ha inducido la sobre explotación de los acuíferos, ya que por cada litro de agua que se recarga se extrae casi el doble (Guerrero T. y., 2009).

De esta forma, el abastecimiento de agua en la CDMX proviene de siete acuíferos que ya están clasificados como sobreexplotados por la CONAGUA. Como se muestra en la tabla 1.3, aún se tiene una alta dependencia de estos recursos hídricos sobreexplotados para abastecer la región. Es importante mencionar que en particular el acuífero de la Zona Metropolitana del Valle de México cuenta ya con un déficit anual de 22.6 m<sup>3</sup>/s (713 hm/año), lo que refleja la grave situación en la que se encuentra en particular este acuífero.

Tabla 1.3. Balance hídrico de los acuíferos que abastecen al Valle de México (m<sup>3</sup>/s)

Acuíferos	Recarga media anual	Descarga natural	Volumen concesionado	Disponibilidad/déficit	
				m <sup>3</sup> /s	hm/año
Zona Metropolitana de la Ciudad de México	16.3	0	38.9	-22.6	-713
Tecocomulco	0.9	0	0	0.8	26
Apan	5	2.8	0.3	1.9	59
Chalco-Amecameca	2.5	0.1	2.9	-0.5	-16
Texcoco	5.1	0.3	6.3	-1.6	-49
Cuautitlán-Pachuca	6.4	0	10.5	-4.1	-129
Soltepec	2.9	1.3	0.6	1.1	33
Total	39.1	4.6	59.5	-25	-788

Fuente: Agua Urbana en el Valle de México, ¿Un camino verde mañana?

Datos de CONAGUA indican que el 77% de la población de la CDMX usa menos de 150 litros por habitante por día, para muchos de ellos, el agua es un recurso escaso, racionado e incluso sumamente caro, ya que sólo es posible obtenerla mediante su transporte en pipas.

En la figura 1.4 se observa que una parte importante de la precipitación pluvial regresa a la atmósfera, mientras que el resto escurre tanto por corrientes como por cuerpos de agua, constituyendo así las aguas superficiales; de no ser así, se infiltra al subsuelo como agua subterránea (CONAGUA, Estadísticas del Agua en México, 2017).

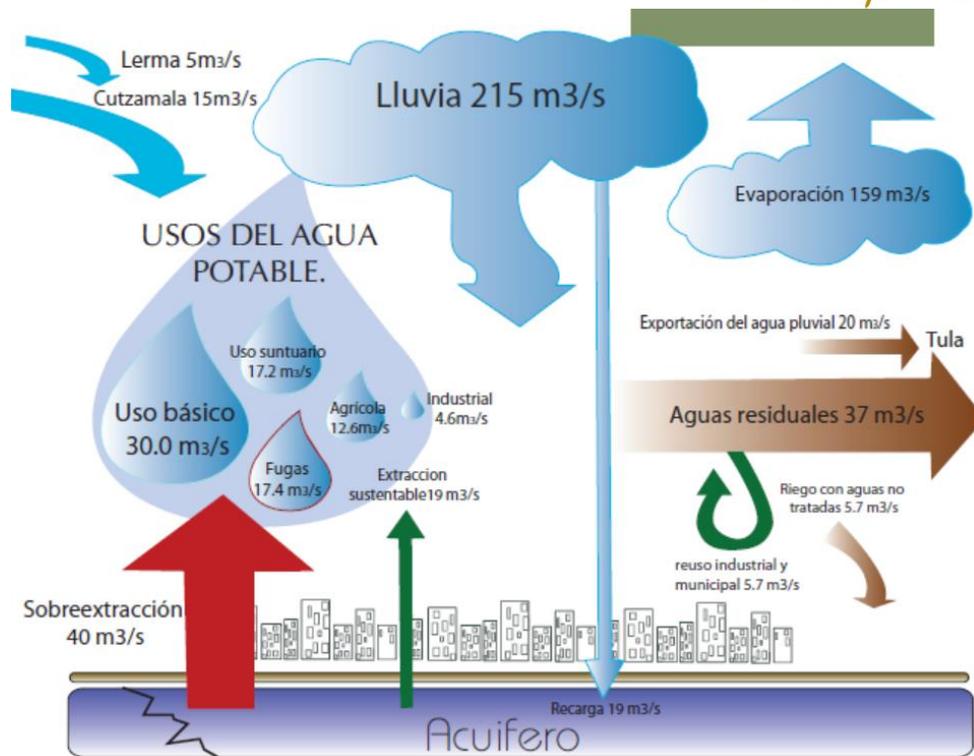


FIGURA 1.4 Gestión de los ciclos hidrológicos en la cuenca de México. FUENTE: CONAGUA. Repensar de la cuenca. La gestión de ciclos del agua en el Valle de México.

El agua renovable es la cantidad de agua máxima que es factible de explotar anualmente sin alterar el ecosistema, es decir, es el agua que es renovada por la lluvia. En nuestro país, el agua renovable total es de 446,777 millones de metros cúbicos, lo que equivale a cubrir todo el territorio con 23 centímetros de agua. De toda esa cantidad de agua de lluvia, el 33% ocurre en el norte y noroeste del país, dejando el otro 67% en el sur y sureste del país (CONAGUA, NUMERAGUA, 2016).

En la figura 1.5 se muestran con más detalle los componentes y los valores que conforman el cálculo del agua renovable. Actualmente en todo el país se reciben aproximadamente 1 449 471 metros cúbicos de agua en forma de precipitación; de esta agua, se estima que el 72% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, 21.5% escurre por los ríos y arroyos y el 6.3% se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Datos de CONAGUA del año 2017 indican que el país cuenta anualmente con 450 828 millones de metros cúbicos de agua dulce renovable, tomando en cuenta los flujos de entrada y salida de agua con los países vecinos.

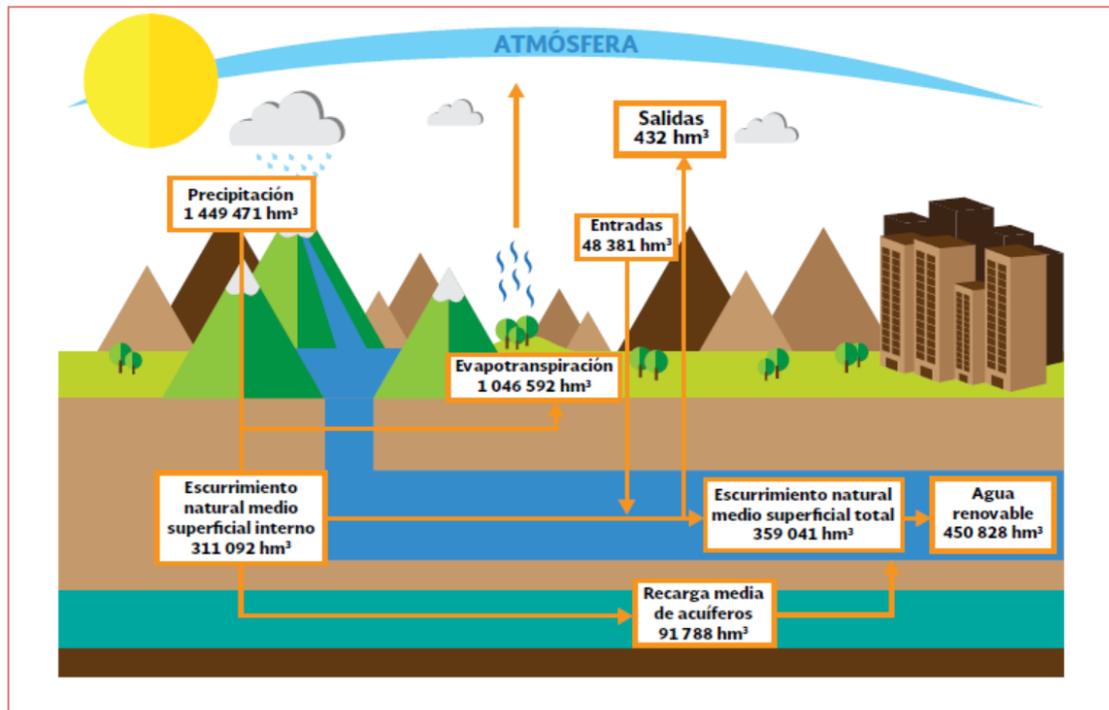


FIGURA 1.5 Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México. FUENTE: CONAGUA. Estadísticas del Agua en México (2017).

Existen factores que determinan el clima en México. Por su ubicación geográfica, la porción sur del país se encuentra en la zona intertropical del globo terráqueo, en tanto que la porción norte se localiza a la misma latitud que los desiertos del Sahara y el Árabe, como se observa en la figura 1.6. Los accidentes geográficos característicos del relieve de nuestro país, inciden directamente sobre la disponibilidad del recurso. Dos terceras partes del territorio nacional se consideran áridas o semiáridas con precipitaciones anuales menores a 500 mm, mientras que una tercera parte, el sureste, es húmedo, con precipitaciones anuales por encima de los 2000 mm por año. En casi todo el territorio la lluvia es más intensa en verano (CONAGUA, Estadísticas del Agua en México, 2017).

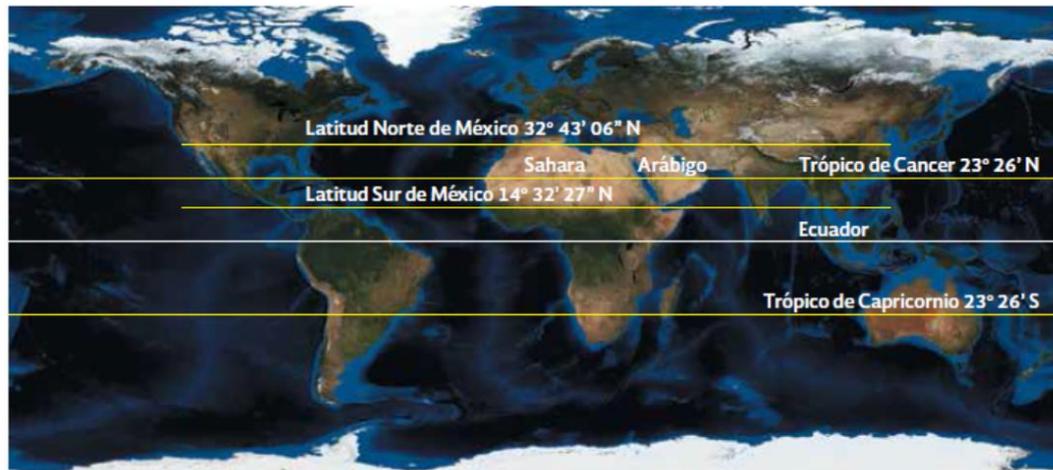


FIGURA 1.6 Ubicación geográfica de México. FUENTE: Elaborado con base en NASA (2016)

Debido a la gran variedad de climas y regiones, se puede decir que el agua pluvial cae de manera heterogénea a lo largo del país. La mayor parte de las lluvias se concentra entre los meses de junio a septiembre; afortunadamente en la actualidad existen algunas tecnologías que permiten captar y aprovechar el agua durante el periodo de lluvias. En las figuras 1.7 y 1.8 se observa la distribución de las precipitaciones pluviales durante los meses de agosto y septiembre del año 2018, lo que permite esclarecer lo que ocurre en el territorio nacional en cuanto a la precipitación pluvial.

La cobertura de agua potable únicamente considera la población con agua entubada que procede de la red pública, pozo comunitario o particular, así como de la llave pública. Para 2015, los rezagos en cuanto a dicha cobertura se encontraban principalmente en los estados de Chiapas, Guerrero, Oaxaca y Veracruz (CONAGUA, NUMERAGUA, 2016).

En el contexto de la escasez hídrica, los sistemas de captación y aprovechamiento de agua pluvial son excelentes para contribuir a mitigar la falta del recurso, complementando al suministro proveniente de la red pública y satisfacer parcialmente las necesidades de aquellos que no cuentan con el servicio público. Además, ante las elevadas tarifas que algunos comercios e industrias tienen que pagar por el líquido, existe una oportunidad para disminuir considerablemente los pagos efectuados a las compañías de agua municipales (Naturales, 2017).

**Precipitación Acumulada Mensual (mm)  
Climatología agosto**

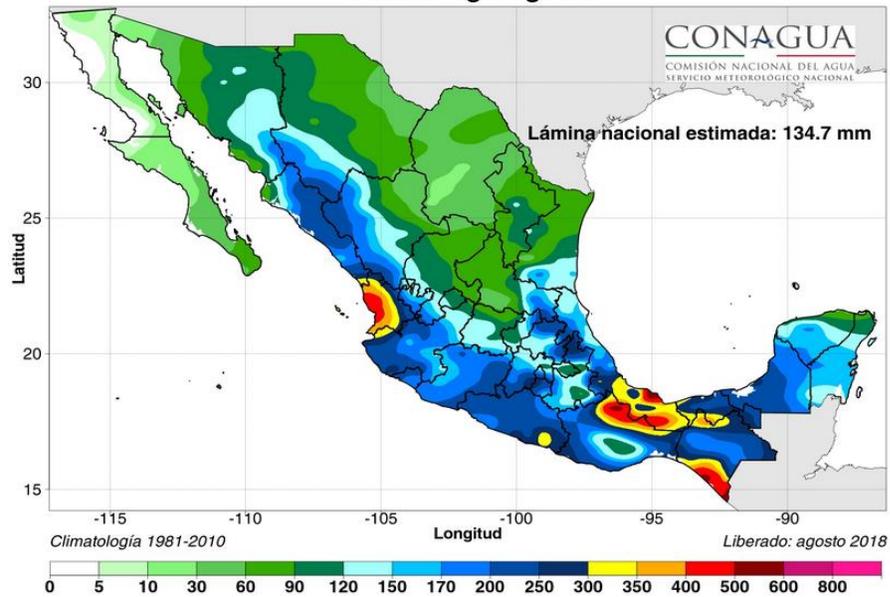


FIGURA 1.7 Precipitación pluvial durante agosto (2018). FUENTE: CONAGUA. Sistema Meteorológico Nacional.

**Precipitación Acumulada Mensual (mm)  
Climatología septiembre**

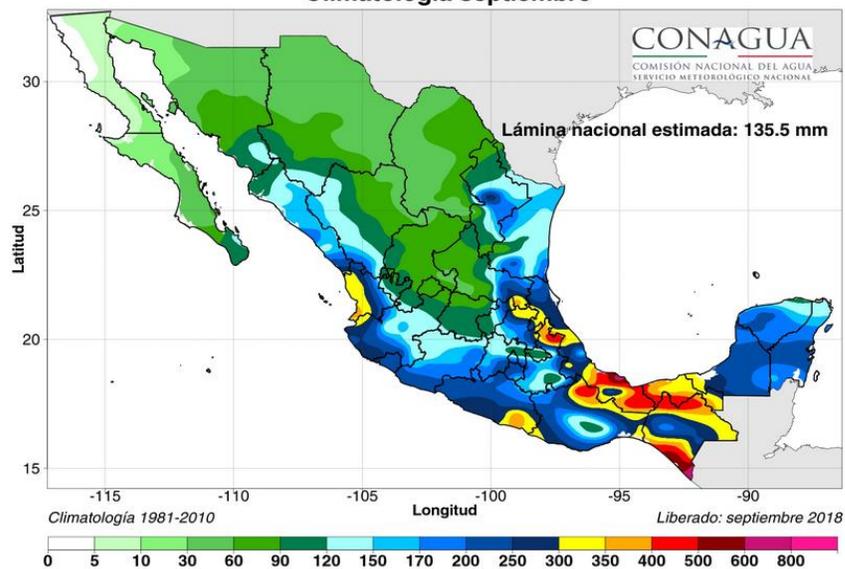


FIGURA 1.8 Precipitación pluvial durante septiembre (2018). FUENTE: CONAGUA. Sistema Meteorológico Nacional.

## 1.5 Alcances y limitaciones

El muestreo se realizó únicamente con el muestreador secuencial de agua de lluvia.

El muestreo se efectuó solo en un sitio. Dada la ubicación del discriminador de primeras lluvias, todas las muestras se tomaron únicamente en un punto; el muestreador secuencial de agua de lluvia se colocó en el mismo sitio.

Dado que el muestreador secuencial cuenta con 18 envases, el muestreo se limitó a eventos de hasta 18 milímetros.

El muestreo corresponde al mes de octubre, ya que como se verá en el capítulo 2, este mes pertenece al último periodo de lluvias.

El horario de muestreo fue únicamente entre las 10:00 y las 21:00 horas debido a los horarios de servicio en el laboratorio.

## 1.6 VIS CASA UNAM

*VIS CASA* es un proyecto en el que participan la Facultad de Arquitectura, la Facultad de Ingeniería, el Posgrado de la Facultad de Ingeniería y el Centro de Investigaciones de Diseño Industrial (CIDI). En la figura 1.9, se muestra la ubicación del prototipo de vivienda construido dentro de Ciudad Universitaria (CU).

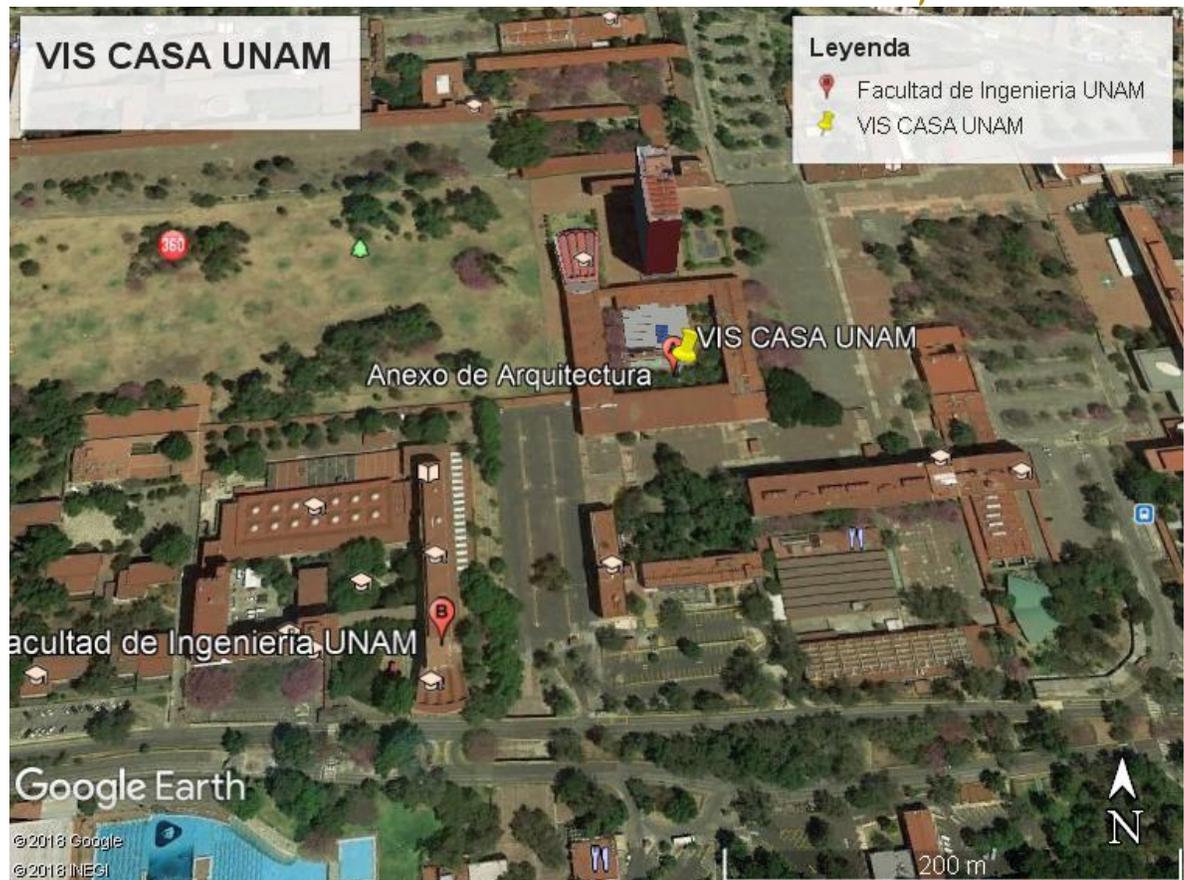


FIGURA 1.9. Ubicación del prototipo VIS CASA UNAM, en CU.



El objetivo principal del proyecto *VIS CASA UNAM* es desarrollar una vivienda sustentable y representar una alternativa al crecimiento urbano en la CDMX.

Las dimensiones del inmueble fueron pensadas para que pudiera ser transportado libremente,

dando como resultado un ancho máximo de 2.60 metros, que es el ancho de vía reglamentado, 7.20 metros de largo, que fue determinado por las vueltas en las



calles de un solo sentido y una altura máxima de 3.60 metros, tomando en cuenta que esa es la altura máxima para casetas de cobro, puentes y cableado urbano.

Como menciona Fernando Fernández en el documento Habita-Mueble: Propuesta Conceptual de vivienda, este prototipo se

fundamenta en las necesidades de algunos sectores de la población de la CDMX, cuyas características y condiciones son particularmente diferentes a las de otras ciudades de la República Mexicana y del mundo, en términos constructivos y de factores económicos y sociales.

La solución pretende utilizar los beneficios de los sistemas industrializados para generar altos volúmenes de producción a costos accesibles y con una calidad mejorada de los productos. Los procesos industriales disminuyen considerablemente los costos y tiempos de entrega, gracias a que los objetos a ser fabricados están cuidadosamente diseñados, tratando de aprovechar al máximo el material y así evitar el desperdicio.

Además, VIS CASA UNAM es un proyecto comprometido con el desarrollo sustentable por lo que pretende disminuir el impacto que tendría éste al incorporarse a los servicios proporcionados por el municipio (luz, agua, drenaje, residuos sólidos), obteniendo un grado de autonomía al tratar de no depender de ellos para su funcionamiento. Pretende gestionar, conjuntamente, procesos integrales para disminuir el impacto ambiental mediante la implementación de nuevas tecnologías para el ahorro de energía.

Contrario a una vivienda de índole tradicional, el proyecto pretende romper la dependencia de la casa hacia el suelo, permitiéndole una movilidad y versatilidad de configuraciones espaciales. No obstante, la vivienda planteada tiene varias limitantes, principalmente arquitectónicas, que podrían en riesgo la aceptación.

Estas son:

- Los diferentes diseños espaciales que traen los sistemas constructivos tradicionales no serán posibles, tendrá que definirse sólo por uno o algunos, por lo tanto, la comodidad interior deberá ser eficiente y atractiva, dando versatilidad en acabados y equipamiento.
- Las dimensiones serán limitadas, ya que el producto se moverá dentro de las naves industriales conforme se vaya materializando y una vez terminado tendrá que transportarse por calles, avenidas y carreteras para su venta y distribución.
- No podrá estar manufacturada con materiales pétreos como cemento y cerámica por ser materiales con pesos altos que además tardan en fraguar y son sensibles a esfuerzos cuando son movidos.
- Se utilizarán materiales estandarizados y procesos constructivos de alta calidad, como maderas finas, vidrios inastillables, alfombras de lana, moldeados pulidos y acabados horneados.
- El mobiliario y equipamiento dentro de la vivienda serán inamovibles puesto que serán parte integral de los pisos, paredes y techos.



Finalmente, hay que aclarar que la propuesta no pretende ser un sustituto de la vivienda actual o plantear las bases de la vivienda futura. *VIS CASA UNAM* es simplemente una propuesta alternativa viable para un mercado específico y no está en contra de la construcción, adquisición de casas tradicionales, amplias e inclusive lujosas.

## 2. Análisis hidrológico de la zona de estudio

El análisis hidrológico de la zona de estudio se hizo con el propósito de identificar datos históricos de la precipitación, tal como la precipitación máxima anual, mensual, así como el patrón de intensidades. Esto brinda un panorama de los periodos de lluvia y sus intensidades.

Este análisis se llevó a cabo principalmente utilizando información digital, ya que estos registros son accesibles para el público. Por otro lado, además de conocer el comportamiento de la precipitación (meses en los que llueve más, precipitación máxima diaria y mensual), fue necesario contar con una guía que facilitó la predicción de la lluvia, que en este caso fueron los sitios web que proporcionan predicciones del clima.

En la figura 1.9 se muestra la localización del sitio donde se realizó el muestreo, mismo lugar en dónde se encuentra instalado el prototipo de vivienda VIS CASA UNAM.



FIGURA 1.9.. Sitio de muestreo, patio CIDI. Obtenido de Google Earth.

## 2.1 Fuentes de información

Es necesario contar con antecedentes del comportamiento meteorológico de la zona de estudio, ya que se debe conocer cuándo y con qué intensidad se puede presentar una tormenta.

En este capítulo se va a hacer uso de información proporcionada por la Base de datos Climatológica Nacional (CLICOM), provenientes de las estaciones meteorológicas más cercanas a la zona de estudio. Los datos que proporciona este sitio de internet datan desde el año 1920 hasta el 2012.

CLICOM es un sistema que proporciona datos climatológicos correspondientes a periodos de 24 horas, que inician a las 8 am. En la figura 2.1 se muestra una captura de pantalla del sitio web.



FIGURA 2.1. Sitio Web CLICOM

Cabe mencionar que CLICOM permite descargar la información y graficar algunos datos climatológicos, como la temperatura y precipitación. Además se puede consultar datos de hasta 25 años de antigüedad, dependiendo de la estación de que se trate, ya que no todas las estaciones tienen la misma antigüedad (CLICOM, 2018).

A través de CLICOM se puede acceder a información proporcionada por el Sistema Meteorológico Nacional, tal como mapas interactivos, que muestran la distribución de lluvias a lo largo del país en distintos periodos: por día, cada tres, cinco o siete días. Se puede acceder a resúmenes mensuales de temperatura y lluvia.

Para este trabajo es necesario contar, además, con una predicción de la lluvia, lo que permitirá planear la toma de muestras. Por ello se va a tomar en cuenta las predicciones de precipitación proporcionadas por el Sistema Meteorológico Nacional.

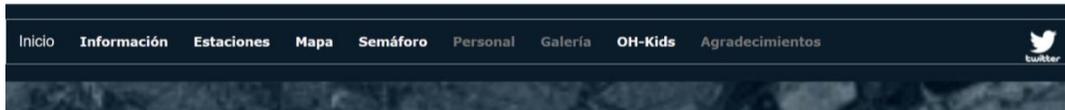
Otra de las fuentes de información consideradas es el Observatorio Hidrológico IIUNAM, cuyo encargado es el Dr. Adrián Pedrozo Acuña. La sede del Observatorio Hidrológico IIUNAM se encuentra en el Instituto de Ingeniería; cuenta con 47 estaciones de medición de lluvia en la CDMX, que proporcionan información en tiempo real; todo esto gracias a la tecnología que permite la transmisión de datos desde lugares remotos para tener acceso a la información en tiempo real, con el fin de evitar desastres en la ciudad (UNAM, 2018).

Cada punto de observación<sup>1</sup> cuenta con un disdrómetro<sup>2</sup> que hace un conteo de las gotas de lluvia y a través de una computadora envía la información para procesarla y posteriormente publicarla en su sitio web y redes sociales. Con los datos obtenidos, se generan mapas de precipitación que están disponibles en la página del observatorio.

---

<sup>1</sup> Se refiere a cada una de las 47 estaciones de medición

<sup>2</sup> Instrumento para medir y registrar la distribución de tamaños de gotas de agua a medida que se producen en la atmósfera. (Ingeniería, 2018)



Este proyecto tiene contemplado expandirse, desarrollando un sistema de alerta temprana del caudal de ríos y drenaje; así como la medición de la calidad del agua.



Asimismo, AccuWeather es una de las aplicaciones que se utilizaron para predecir el clima y con ello preparar el muestreo. Esta plataforma proporciona la temperatura, la velocidad del viento, la humedad, entre otros datos en tiempo real y predicciones cada hora y de la semana.



La app de Clima de Google también fue utilizada para conocer las predicciones de lluvia. Esta aplicación es más completa, ya que además de predecir hora con hora la probabilidad de lluvia, predice los milímetros que se pueden obtener en el muestreo. Además de lo anterior, proporciona temperatura actual, temperaturas máxima y mínima durante el día y la noche, humedad, índice UV y velocidad y dirección del viento.

## 2.2 Registros y análisis de los datos pluviales

El país se divide en 13 regiones hidrológico-administrativas, esto con el fin de la administración y preservación de las aguas nacionales. La CDMX se encuentra en la región hidrológica número trece correspondiente a aguas del Valle de México (CONAGUA, Estadísticas del agua en México, 2008)

Para el análisis de los datos pluviales se obtuvo información de estaciones que tuvieran al menos 25 años de datos y que, en medida de lo posible, estuvieran cerca de la zona de estudio, esto para poder constatar los meses en los que se presentan las lluvias máximas. En la figura 2.1 se muestra un mapa con la ubicación de las estaciones consultadas. El periodo de estudio comprende de julio a septiembre, con algunos picos en octubre, con lo cual, el estudio realizado a las muestras podrá considerarse representativo de las lluvias máximas.

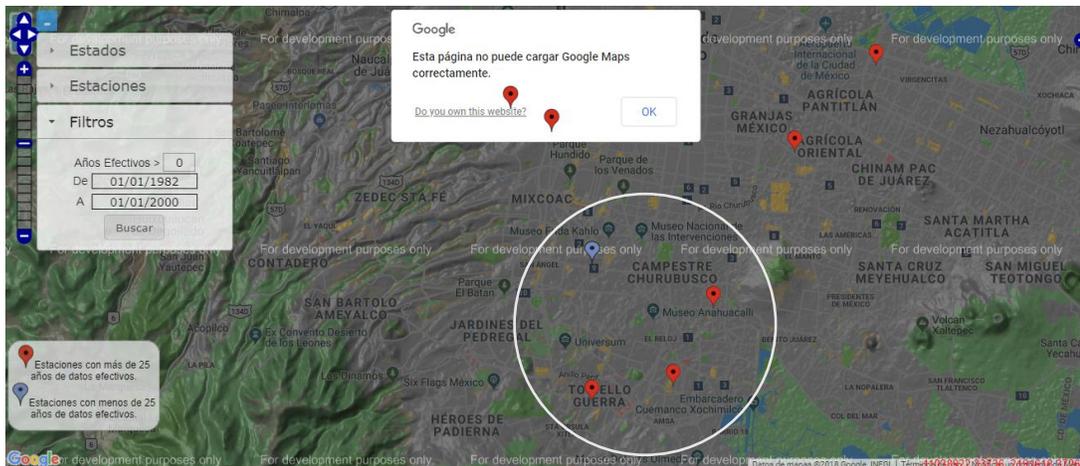


Figura 2.1 Ubicación de estaciones más cercanas a la zona de estudio. Fuente: CLICOM

Las estaciones consultadas fueron:

- Campo experimental Coyoacán
- Santa Úrsula Coapa
- Desviación alta al Pedregal
- Colonia Educación

En las figuras 2.2 a 2.5, se muestra el promedio diario de precipitación en las estaciones antes mencionadas. La precipitación promedio diaria es la lámina de agua acumulada en un día de observación (de 8 AM A 8 AM) en los años que se

está observando; en este caso de 1982 a 2015 o de 1976 a 2007. Se encontró que el promedio diario de lluvias es mayor en el mes de septiembre.

En la figura 2.2, la mayor precipitación promedio diaria durante un año es de 10 mm, lo mismo sucede con las estaciones Coapa y Colonia Educación, a diferencia de la estación Desviación Alta Pedregal, donde la precipitación promedio diaria más alta es de 12 mm.

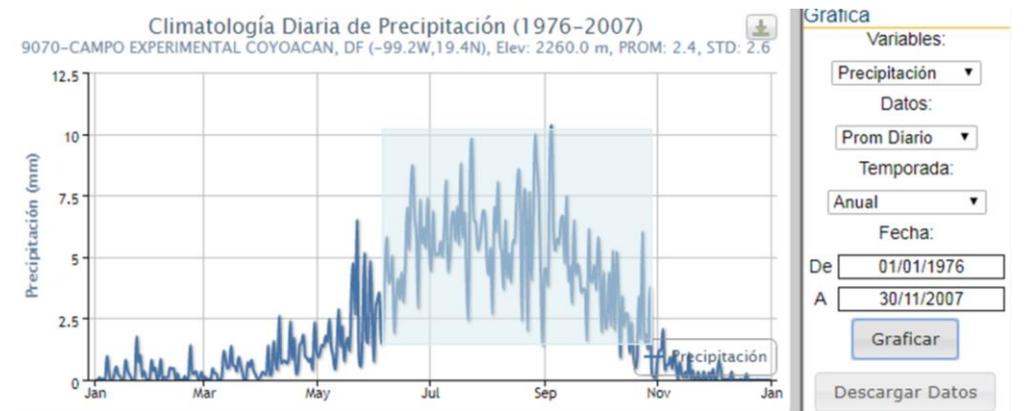


Figura 2.2. Promedio diario de precipitación en la estación Campo experimental Coyoacán. Fuente: CLICOM

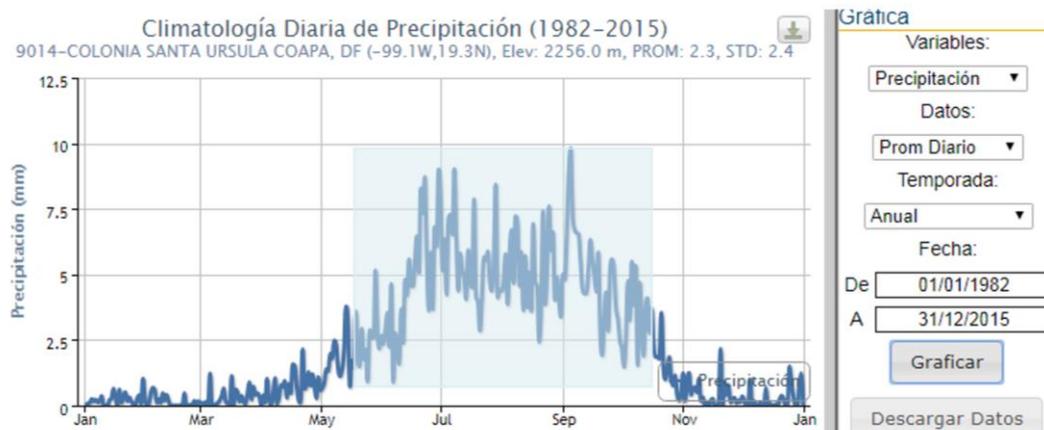


Figura 2.3. Promedio diario de precipitación en la estación Colonia Santa Úrsula Coapa. Fuente: CLICOM



Figura 2.4. Promedio diario de precipitación en la estación Desviación alta al Pedregal. Fuente: CLICOM

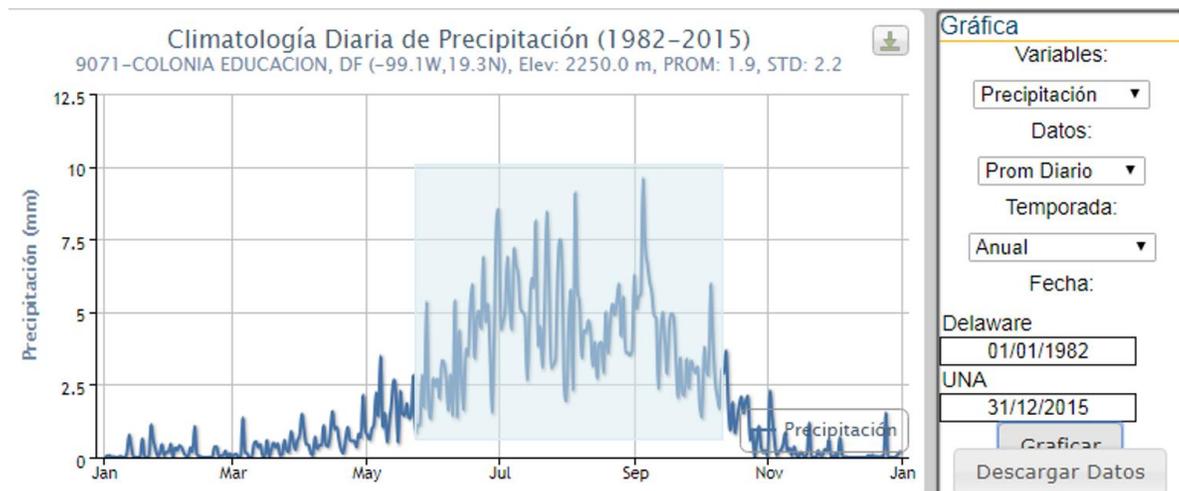


Figura 2.5. Promedio diario de precipitación en la estación Colonia Educación. Fuente: CLICOM

En las figuras 2.6 a 2.9, se observa el promedio mensual de precipitación, el cual presenta la tendencia de que en el mes de julio hubo más precipitación que cualquier otro mes, teniendo presente que el promedio diario de precipitaciones se presenta en el mes de septiembre.

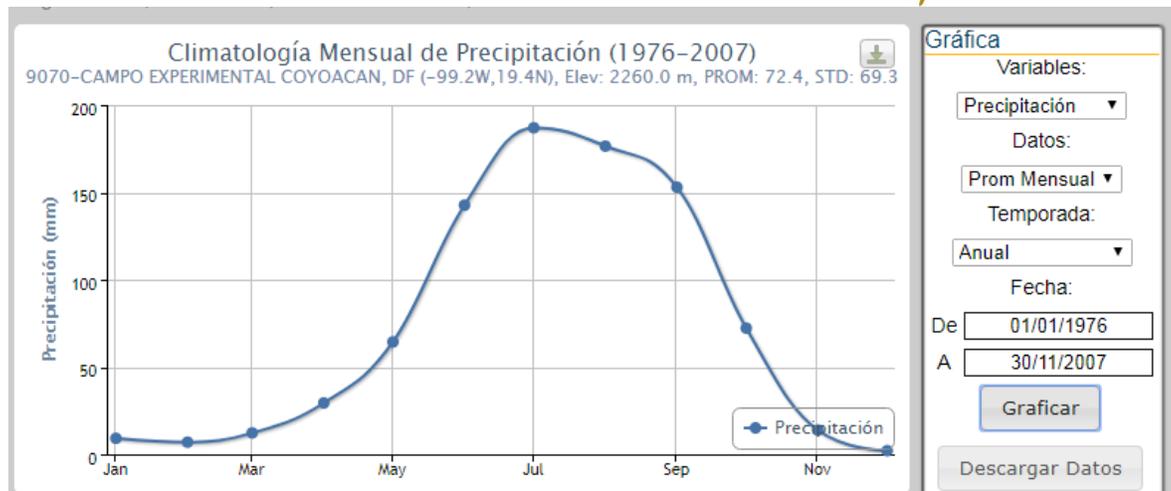


Figura 2.6. Promedio mensual de precipitación en la estación Campo experimental Coyoacán. Fuente: CLICOM

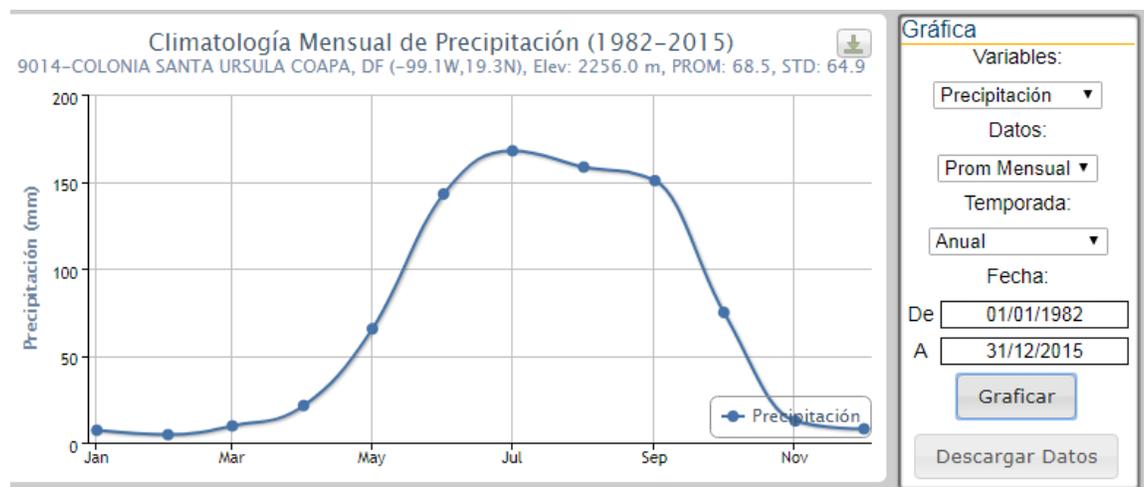


Figura 2.7. Promedio mensual de precipitación en la estación Santa Úrsula Coapa. Fuente: CLICOM

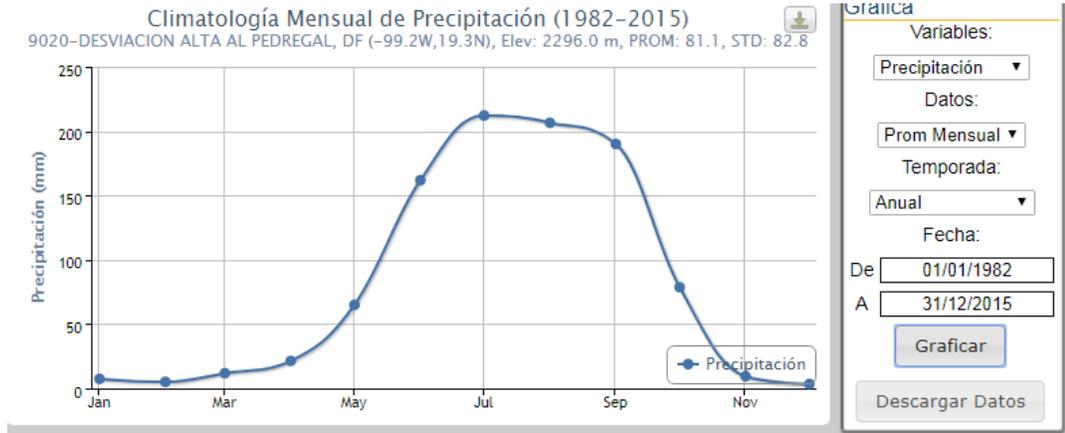


Figura 2.8. Promedio mensual de precipitación en la estación Desviación alta al Pedregal. Fuente: CLICOM

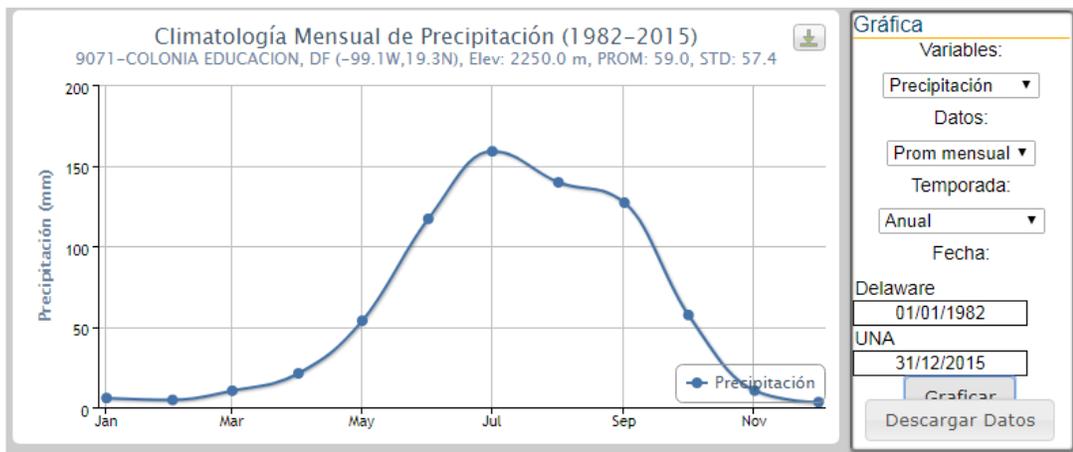


Figura 2.9. Promedio mensual de precipitación en la estación Colonia Educación. Fuente: CLICOM

Como resultado de lo anterior, se puede concluir que es conveniente que el muestreo se realice entre julio, agosto y septiembre, ya que en esos meses es en donde se concentran las lluvias más significativas en el año.

A pesar de lo anterior, el muestreo se realizó en el mes de octubre, debido a algunos problemas técnicos con el equipo muestreador secuencial.

## 2.3 Análisis del potencial de aprovechamiento en la zona de estudio

Con los datos observados en el subcapítulo anterior y con los datos de precipitación pluvial de la zona de estudio se realizó este análisis. En la tabla 2.10 se muestran los datos de precipitación en CU y en la figura 2.11 se observa el comportamiento en una gráfica de la precipitación en esta zona.

Tabla 2.10 Datos de precipitación en la zona de estudio

Mes	Precipitación [mm]
Enero	3.97
Febrero	2.76
Marzo	6.12
Abril	12.57
Mayo	33.29
Junio	76.24
Julio	96.22
Agosto	90.26
Septiembre	82.52
Octubre	38.15
Noviembre	6
Diciembre	3.11

Fuente: Ingeniera Viridiana Hernández Santiago ““Diseño de las instalaciones para el suministro de agua de la Vivienda Industrializada Sustentable (VIS CASA UNAM) y la alternativa de captación de agua pluvial como complemento del suministro de agua”” 2018.

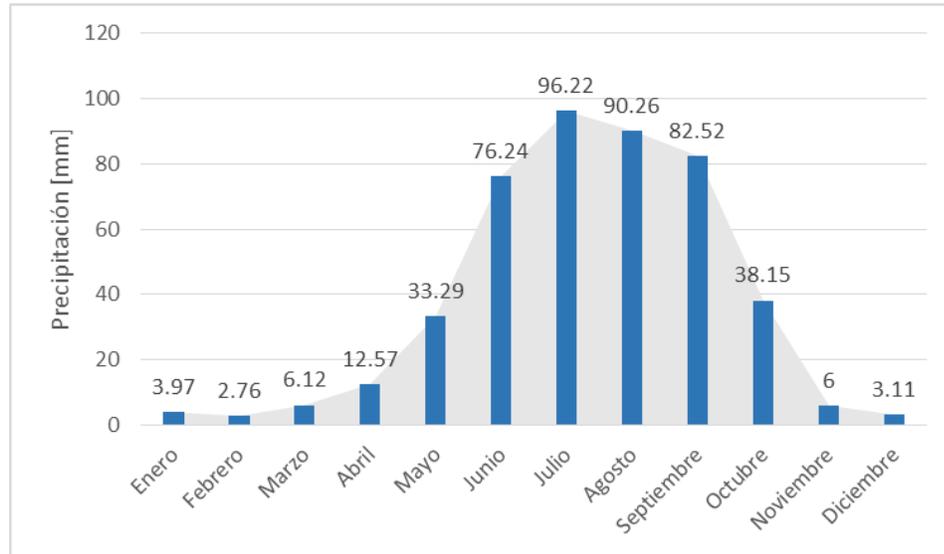


Figura 2.11 Comportamiento de la precipitación pluvial en la zona de estudio. Fuente: “Diseño de las instalaciones para el suministro de agua de la Vivienda Industrializada Sustentable (VIS CASA UNAM) y la alternativa de captación de agua pluvial como complemento del suministro de agua”. Ing. Esp. Viridiana Hernández Santiago

La demanda de agua potable de VIS CASA es de 300 [l/hab/día], además se considera que el material del que está construido el techo es plástico ABS laminado, por lo tanto el coeficiente de escorrentía que se utilizará en este caso es de 0.9 (Santiago, 2018).

Para realizar el cálculo de la oferta de agua en los 12 meses del año en metros cúbicos se utilizó la siguiente fórmula:

$$A_i = \frac{Pp_i * Ce * Ac}{1000}$$

Donde:

- $Pp_i$  se refiere a la precipitación promedio mensual [l/m<sup>2</sup>]
- $Ce$  es el coeficiente de escorrentía, en VIS CASA = 0.9
- $Ac$  es el área de captación,  $Ac=14.25$  m<sup>2</sup>
- $A_i$  se refiere a la oferta de agua en el mes “i”, en [m<sup>3</sup>]

Como se observa en la tabla 2.12, si se captara todo el volumen de agua, se tendría un total de 5786.77 litros, pero como se verá en el capítulo 6, no es recomendable captar todo el volumen de agua pluvial debido a la calidad del agua en los primeros milímetros de lluvia.

Tabla 2.12 Oferta de agua pluvial en la zona de estudio

Mes	Precipitación [mm]	Área de captación [m <sup>2</sup> ]	Coefficiente de escorrentía	Oferta de agua en el mes [m <sup>3</sup> ]	Oferta de agua en el mes [L]
Enero	3.97	14.25	0.9	0.0509	50.92
Febrero	2.76	14.25	0.9	0.0354	35.40
Marzo	6.12	14.25	0.9	0.0785	78.49
Abril	12.57	14.25	0.9	0.1612	161.21
Mayo	33.29	14.25	0.9	0.4269	426.94
Junio	76.24	14.25	0.9	0.9778	977.78
Julio	96.22	14.25	0.9	1.2340	1234.02
Agosto	90.26	14.25	0.9	1.1576	1157.58
Septiembre	82.52	14.25	0.9	1.0583	1058.32
Octubre	38.15	14.25	0.9	0.4893	489.27
Noviembre	6	14.25	0.9	0.0770	76.95
Diciembre	3.11	14.25	0.9	0.0399	39.89
				TOTAL [L]	5786.77

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos del documento "Diseño de las instalaciones para el suministro de agua de la Vivienda Industrializada

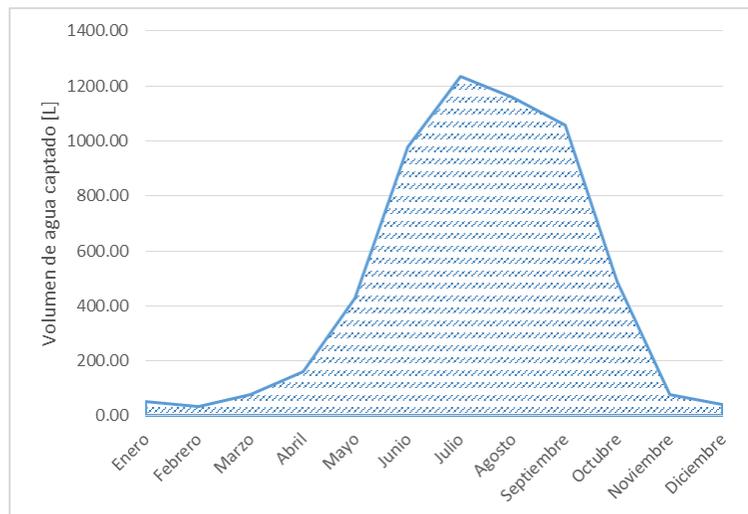


Figura 2.13. Gráfica del volumen de agua pluvial posible de captar por mes. Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos del documento "Diseño de las instalaciones para el suministro de agua de la Vivienda Industrializada Sustentable (VIS CASA UNAM) y la alternativa de captación de agua pluvial como complemento del suministro de agua"

### 3. Calidad del agua de lluvia

Como se verá en el apartado 3.2, existe una relación estrecha entre la calidad de la atmósfera y la calidad del agua de lluvia, ya que la primera contiene partículas y contaminantes que no necesariamente provienen de la actividad humana, y que están en contacto con las moléculas de agua que están contenidas en la atmósfera. Como resultado, cuando el agua que se encuentra en la nube precipita, ya contiene en mayor o menor medida, algunas partículas y contaminantes.

Para comprobar o refutar la hipótesis del presente trabajo, es necesario conocer las condiciones atmosféricas del sitio, además de la calidad del aire; por lo que se va a recurrir a distintas fuentes de información que permitan su identificación durante la precipitación.

En ese sentido, se consultaron algunas páginas oficiales que proporcionan datos de calidad del aire en tiempo real, una de ellas es el Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA) que facilita información de calidad del aire a través de estaciones de monitoreo que forman parte del Sistemas de Monitoreo de Calidad del Aire (SMCA).

Entre la información que proporciona esta página están datos crudos<sup>3</sup> de calidad del aire, variables meteorológicas en tiempo real e indicadores de calidad del aire, en donde además se pueden descargar datos históricos.

La Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos (ROUA) recopila datos atmosféricos y ambientales con fines académicos en diferentes puntos del país. La UNAM establece la ROUA, para impulsar la investigación y la docencia de las ciencias atmosféricas en el país. A través de la interdisciplina y la cooperación

---

<sup>3</sup> Datos crudos, son aquellos que se recogen desde la fuente, es decir, no han sido sujetos a procesamiento u otra manipulación.

institucional, el proyecto busca proveer de información atmosférica relevante y confiable para estudiar los problemas emergentes y dar soluciones a los retos que enfrenta el planeta en materia de contaminación atmosférica, cambio climático, recursos hídricos, seguridad alimentaria entre otros. Además, la difusión de conceptos fundamentales y prácticos de los temas relacionados con las ciencias atmosféricas, por parte de las universidades participantes, representa un cometido medular de la RUOA para poder asegurar que las nuevas generaciones de científicos cuenten con las herramientas adecuadas para su información (RUOA, 2018).

En la figura 3.1 se muestra una imagen de la página web de RUOA UNAM.



Figura 3.1. Sitio web RUOA UNAM

### 3.1 Características de la atmósfera en la zona de estudio

La atmósfera es una mezcla de gases de 640 kilómetros de espesor, su composición ha evolucionado durante miles de años, permitiendo el desarrollo de la vida. La mezcla de gases que conforman la atmósfera se compone por el 78 por ciento de nitrógeno (N), y el 21 por ciento de oxígeno (O<sub>2</sub>), aproximadamente, en porcentaje casi constante, como se muestra en la tabla 3.2 (SEMARNAT, 2013).

TABLA 3.2 Composición química de la atmósfera

Gas	Fórmula	Volumen (%)
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	78
Oxígeno	O <sub>2</sub>	21
Argón	Ar	0.93
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	0.039
Neón	Ne	0.0008
Helio	He	0.0005
Metano	CH <sub>4</sub>	0.00017
Kriptón	Kr	0.0001
Óxido nitroso	N <sub>2</sub> O	0.00003
Bajo Nivel de Ozono (tropósfera)	O <sub>3</sub>	0.000001 a 0.00005
Alto nivel de ozono (estratósfera)	O <sub>3</sub>	0.000004 a 0.00002
Vapor de agua	H <sub>2</sub> O	Variable

. FUENTE: SEMARNAT. Calidad el aire: una práctica de vida (2013).

En los últimos 5 kilómetros más próximos a la superficie terrestre se encuentran las capas bajas de la atmósfera, donde se concentra la mitad de su masa total y en la cual se presentan los fenómenos meteorológicos (SEMARNAT, 2013).

En la figura 3.3 se observa la estructura de la atmósfera.

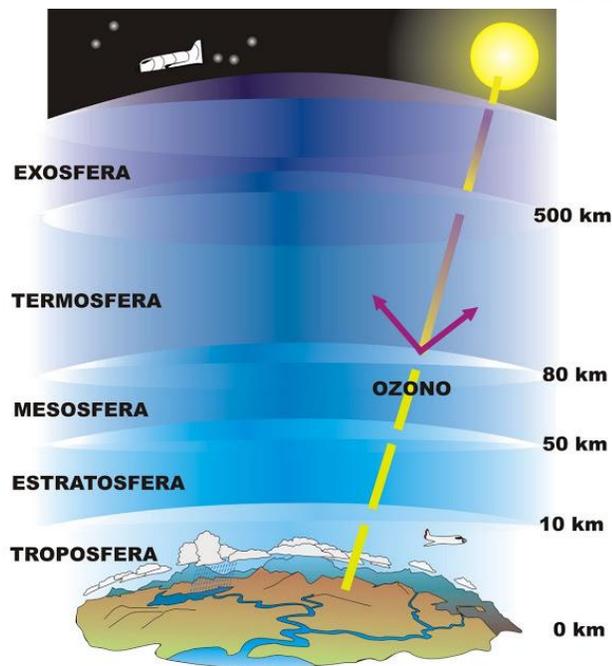


FIGURA 3.3. Estructura de la atmósfera. FUENTE: BLOG. Química en el ambiente

En la página de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) se asegura que la atmósfera es esencial para la vida, ya que cumple diversas funciones con el fin de conservar la vida en el planeta, entre ellas están las siguientes:

- Alojar la capa de ozono cuya función es filtrar los rayos UV provenientes del sol.
- Participa en la regulación del clima, ya que propicia el movimiento de las masas de aire tanto frío como caliente sobre los océanos y sobre las masas continentales; lo que favorece el transporte del vapor de agua que después se vierte en forma de precipitación en los continentes.
- Contiene algunos elementos químicos que son vitales para los seres vivos como son el carbono y el nitrógeno.

En las zonas urbanas se realizan algunas actividades que liberan una enorme cantidad de sustancias, como los gases efecto invernadero y algunas partículas que pueden permanecer suspendidas algunos días.

Como se mencionó en los párrafos anteriores, los fenómenos meteorológicos ocurren en los primeros kilómetros de la atmósfera, los más cercanos al planeta. Es importante conocerlos, ya que modifican la calidad del agua de lluvia.

Uno de estos factores es la calidad del aire. El deterioro de la calidad del aire puede percibirse en algunos casos con facilidad, sobre todo en las grandes ciudades, al disminuir la visibilidad del paisaje o causar irritación de los ojos, garganta, etc. No obstante, es necesario evaluar de manera cuantitativa su calidad, esto es, mediante la medición de la concentración de los contaminantes que se presentan (Climático, 2018).



En una ciudad es fácil identificar la contaminación del aire y asociarla a la actividad industrial, comercial y al uso de vehículos, sin embargo, no son la única causa, los fenómenos naturales que se producen en la superficie y en el

interior de la tierra también contribuyen a la contaminación del aire (SEMARNAT, 2013).

FOTO: Smog in Schanghai, Dezember 1993. German Wikipedia, original upload 6. Nov 2005 by [DL5MDA](#) (selfmade)

Existen indicadores de la calidad del aire, que permiten evaluar el estado de la contaminación atmosférica y con esto, comunicar al público cuál es la calidad del aire que respira. Una de las formas para evaluar la calidad del aire es comparar las concentraciones de los contaminantes obtenidos de las redes de

monitoreo con los límites permisibles establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) publicadas por la secretaría de salud (Climático, 2018).

Para evaluar el estado de la contaminación atmosférica, mediante los criterios establecidos en las NOM, se toman en cuenta seis contaminantes:

- Partículas suspendidas PM10 y PM2.5,
- Ozono (O<sub>3</sub>),
- Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>),
- Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>).
- Monóxido de carbono (CO)

En la tabla 3.4, se muestran los indicadores evaluados según las NOM.

TABLA 3.4 Indicadores del cumplimiento de la NOM.

Contaminante	Dato base utilizado para la evaluación	Exposición	Frecuencia tolerada	Valor límite indicador con el que se evalúa	Criterio de suficiencia anual	Norma Oficial Mexicana
Partículas menores de 10 micrómetros (PM10)	Promedio 24 horas	Aguda	No se permite	75 µg/m <sup>3</sup> máximo	Por lo menos tres trimestres con al menos el 75% de los promedios de 24 horas válidas	NOM-025-SSA1-2014 (DOF,2014)
		Crónica	----	40 µg/m <sup>3</sup> Promedio anual		
Partículas menores de 2.5 micrómetros (PM2.5)	Promedio 24 horas	Aguda	No se permite	45 µg/m <sup>3</sup> Máximo		
		Crónica	----	12 µg/m <sup>3</sup> Promedio anual		
Ozono (O <sub>3</sub> )	Dato horario	Aguda	No se permite	0.095 ppm Máximo	Al menos 75% de los datos horarios	NOM-020-SSA1-2014 (DOF 2014)
	Promedios móviles de 8 horas		No se permite	0.070 ppm Máximo		
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	Promedio móvil de 8 horas 8 horas	Aguda	1 vez al año	0.200 ppm Segundo máximo	----	NOM-022-SSA1-2010 (DOF 2010)
	Promedio 24 horas	Aguda	No se permite	0.110 ppm Máximo	----	
	Dato horario	Crónica	----	0.025 ppm Promedio anual	----	
Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	Dato horario	Aguda	1 vez al año	0.210 ppm Segundo máximo	----	NOM-023-SSA1-1993 (DOF 1994)
Monóxido de carbono (CO)	Promedio móvil de 8 horas	Aguda	1 vez al año	11 ppm Segundo Máximo	----	NOM-021-SSA1-1993 (DOF 1994)
Plomo (Pb)	Muestreo 24 horas	Crónica	No se permite	1.5 µg/m <sup>3</sup> Promedio trimestral	----	NOM-026-SSA1-1993 (DOF 1994)

FUENTE: SEMARNAT. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2018).

### 3.2 Interacción de la precipitación pluvial y la atmósfera

Como se menciona en el artículo *El agua en la atmósfera* de la Academia Mexicana de Ciencias, dentro del ciclo del agua existe un proceso natural de destilación que se logra con la evaporación, es decir, el agua se evapora dejando atrás sales y otros compuestos. Este proceso de evaporación se enturbia debido a la contaminación

del agua atmosférica. Esta contaminación no afecta únicamente a los sitios donde se emite, sino que tiene la potencialidad de ser transportada, mezclarse con otros contaminantes y además alterar el agua de lluvia en varias “generaciones” de lluvia, hasta finalmente ser precipitada a la superficie.

Es importante tener presente que en el interior de una nube se llevan a cabo numerosas reacciones químicas. En dichas reacciones, la parte soluble de las partículas entra a las gotas y participa en sus reacciones. La composición de los núcleos de condensación depende de si su origen es natural (proveniente de desiertos, erupciones volcánicas, el mar, organismos vivos) o producto de las actividades humanas. Las partículas menos solubles como el polvo y polen pueden quedarse en el aire sin reaccionar hasta que son arrastradas por la lluvia o arrastradas a otros sitios.

Del mismo modo, algunos gases también logran penetrar las gotas, cambiando las características del agua de lluvia. En el caso de la lluvia ácida, los gases que participan en estas reacciones son producto de la actividad humana.

### 3.3 Normatividad

Para poder realizar una comparación más objetiva de los datos ya obtenidos por otros investigadores, es necesario tener conocimiento de la normatividad aplicable en México, así como de algunos estándares a nivel mundial, como lo es la Organización Mundial de la Salud (OMS), en cuanto a agua para consumo humano. Todo lo anterior, proporciona una visión más clara de que tan lejos está el agua pluvial de ser usada para el consumo humano.

En los subcapítulos 3.3.1 y 3.3.2, se aborda la normatividad vigente en México y a nivel mundial (OMS).

### 3.3.1 NOM-127-SSA-1994

Esta Norma Oficial Mexicana (NOM) establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional (Salud, 1994).

En la tabla 3.5 se muestran los límites permisibles de características bacteriológicas que establece la NOM-127.

En el caso de las características bacteriológicas, no se permite la presencia de coliformes fecales, ya que pueden ser agentes nocivos a la salud.

Tabla 3.5 Límites permisibles de características bacteriológicas

Característica	Límite permisible
Organismos coliformes totales	2 NMP/100 ml
	2 UFC/100 ml
Organismos coliformes fecales	No detectable NMP/100 ml
	Cero UFC/100 ml

Fuente: NOM-127-SSA-1994

También se deben evaluar las características físicas del agua, es decir, el olor, sabor, color y turbiedad. En el caso del olor y el sabor son pruebas sensoriales, a diferencia del color y turbiedad, que son pruebas que se hacen analíticamente en el laboratorio. En la tabla 3.6 se muestran los límites permisibles de características físicas y organolépticas que establece la NOM-127.

Tabla 3.6 Límites permisibles de características físicas y organolépticas

Característica	Límite permisible
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico)
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

Fuente: NOM-127-SSA-1994

De la misma forma se deben evaluar las características químicas, que son aquellas que son debidas a elementos o compuestos químicos. Se ha demostrado científicamente que si el agua llegara a presentar alguna de estas características por encima del límite, podría tener efectos nocivos en la salud humana. En la tabla 3.7 se observan los límites permisibles de características químicas que establece la NOM-127-SSA-1994.

Tabla 3.7 Límites permisibles de características químicas según la NOM-127-SSA-1994

Característica	Límite permisible
Aluminio	0.2
Arsénico	0.05
Bario	0.7
Cadmio	0.005
Cianuros (como CN <sup>-</sup> )	0.07
Cloro residual libre	0.2-1.50
Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )	250
Cobre	2
Cromo total	0.05
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001
Fierro	0.3
Fluoruros (como F <sup>-</sup> )	1.5
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Nitratos (como N)	10
Nitritos (como N)	0.05
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.5
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6.5-8.5
Plaguicidas en microgramos/l: Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0.03
Clordano (total de isómeros)	0.3
DDT (total de isómeros)	1
Gamma-HCH (lindano)	2
Hexaclorobenceno	0.01
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Metoxicloro	20
2,4 - D	50
Plomo	0.025
Sodio	200
Sólidos disueltos totales	1000
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> )	400
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.5
Trihalometanos totales	0.2
Zinc	5

Fuente: NOM-127-SSA-1994

### 3.3.2 Organización Mundial de la Salud

Las normas sobre el agua de consumo humano pueden diferir en naturaleza y forma, entre los países y regiones. No hay un método único que pueda aplicarse de forma universal. En la elaboración y la aplicación de normas, es fundamental

tener en cuenta las leyes vigentes y en proyecto relativas al agua, a la salud y al gobierno local, así como evaluar la capacidad de cada país para desarrollar y aplicar reglamentos. Los métodos que pueden funcionar en un país o región no necesariamente podrán transferirse a otros países o regiones (OMS, Guías para la calidad del agua de consumo humano, 2018).

La OMS establece que este documento es únicamente una guía, ya que se menciona que se debe recurrir primero a las normas vigentes en cada país, en este caso a la NOM-127-SSA-1994.

Estas guías pueden aplicarse a sistemas de agua de consumo humano distribuida por tuberías, a los sistemas de abastecimiento de agua sin tuberías en comunidades y viviendas individuales.

En esta guía se encuentran algunas sugerencias en cuanto a límites recomendables de los parámetros químicos, microbiológicos y organolépticos referentes a agua para consumo humano.

En cuanto a los parámetros organolépticos, que están en función de la aceptabilidad del consumidor (sabor y olor del agua), la OMS no establece valores de referencia, pero pueden tener gran importancia en la percepción del consumidor respecto a su confianza en el agua.

Por otro lado, no todas las sustancias químicas se encuentran en todos los sistemas de abastecimiento, de hecho tampoco están en todos los países. Por esta razón es importante que las estrategias de gestión de riesgos y la asignación de recursos den prioridad a las sustancias químicas que representan un riesgo a la salud. En la tabla 3.8 se observan los límites de parámetros químicos recomendados por la OMS referentes a agua para consumo humano.

Tabla 3.8. Límites de parámetros químicos recomendados por la OMS

Contaminante	Límite recomendable
Aluminio	0.1-0.2
Amoniaco	1.5
Cloruro	250
Color	15 UCV
pH	6.5-8
Sólidos disueltos totales	1000
Turbidez	5 UTN

Fuente: Guías para la calidad del agua potable. OMS

### 3.4 Resultado de otros estudios de calidad del agua de lluvia

Existen diversos estudios en cuanto a calidad del agua de lluvia, pero para fines de este trabajo se consideraron algunas tesis, tesinas y algunos artículos científicos. Todos los anteriores, incluyen caracterización de agua de lluvia en diferentes partes del mundo y condiciones.

Todos los estudios de calidad del agua pluvial que se consultaron tenían algo en común, que en todos los casos las muestras se tomaron después de que el agua escurriera por una superficie, ya sea un techo y/o alguna canaleta.

Aunque no todos los muestreos se hicieron bajo las mismas condiciones, se puede ver que la mayoría de ellos se encontraba dentro de un rango de valores, que permite describir un patrón.

El objetivo principal del estudio de la calidad del agua de lluvia de (Villegas, 2013), fue determinar la factibilidad de captación de agua pluvial para su aprovechamiento, a partir de un análisis químico. Las muestras tomadas fueron compuestas.

Por otro lado, el objetivo principal del estudio de la calidad de agua pluvial del trabajo de (Velázquez, 2012), fue diseñar un sistema de captación de agua de lluvia para

uso doméstico, para esto se realizaron diversos muestreos en varias zonas de la CDMX. En este caso, se seleccionaron cuatro puntos de muestreo:

- Techo. Una cubeta en la bajada del agua de lluvia captada por una sección aprox. 6 m<sup>2</sup> de techo de cemento con impermeabilizante plástico y terminado en gravilla.
- Patio. Una cubeta en la bajada de agua de una sección de aprox. 10 m<sup>2</sup> de patio loseta cerámica.
- Base. Una cubeta para el agua de lluvia que precipitó sin tocar otra superficie que no sea la propia cubeta.
- Autotanque. Procedente de autotanques (Velázquez, 2012)

A diferencia del autor anterior, en el texto “*Variations in rainwater quality from roof catchments*” el muestreo se realizó con ayuda de un sistema construido con pvc, las muestras se tomaron en envases de 1 litro, que contenían una pelota que tapaba la entrada del envase una vez que éste estaba lleno. Este es el método de muestreo más parecido al que se realizó para el presente trabajo.

Otro de los autores que fueron consultados fue J.Y. Lee, *et. al.*, que en su documento “*Quality of roof-harvested rainwater-Comparison of different roofing materials*” . El muestreo se realizó con ayuda de 4 modelos de techo construidos con diferentes materiales, pero con la misma área de 2.55 m<sup>2</sup> y con un ángulo de inclinación de 20.5° con respecto a la horizontal. Este modelo para captación cuenta con un separador de primeras lluvias de 5 litros, el contenedor de primer flujo de agua cuenta con una pelota que cierra el contenedor una vez que este se llena. La conducción de agua se hace a través de una línea de conducción de pvc. El contenedor final, es decir en donde se almacena el resto de la lluvia tiene una capacidad de 500 litros, de este último tanque se toman las muestras en envases esterilizados con un volumen final de 500 ml.

En el artículo “*Rainwater quality from different roof catchments in the Port Harcourt DISTRICT, Rivers State, Nigeria*” se realizó un estudio de la calidad del agua de lluvia principalmente porque esta es la única fuente de agua que se tiene en muchas zonas rurales de Nigeria y se usa para realizar tareas diarias en el hogar, como lavar, cocinar y beber. Este muestreo se realizó en diferentes tipos de superficies,

los contenedores que se utilizaron fueron de 5 litros de capacidad, se esterilizaron antes de cada muestreo y colocados en una esquina de la azotea. El muestreo se realizó 10 ó 20 minutos después de que el evento comenzó.

El muestreo en zonas industriales, no se hizo de la misma forma, ya que no se permitió que el agua de lluvia pasara por una superficie antes de llegar al envase, la colecta de agua fue directamente del agua que caía.

En la tabla 3.8 se muestran los resultados de algunos estudios de calidad del agua de lluvia en diferentes partes del mundo.

Tabla 3.8. Resultados de caracterización de agua de lluvia

Fuente	Valores	pH	Turbiedad (UTN)	Color	Coliformes fecales
NOM-127	Mínimo	6.5	5	20	0
	Máximo	8.5	5	20	
OMS	Mínimo	6.5	<1	15	0
	Máximo	8	<1	15	
García Villegas (2013)	Mínimo	6.73	15	3	0
	Máximo	7.29	70	28	
Nnene Beatrice	Mínimo	7.02	0.3	5	0
	Máximo	7.45	0.43	20	
Ju Young Lee et. Al.	Mínimo	6	ND	ND	0
	Máximo	7.9	ND	ND	
Velázquez , H. (2012)	Mínimo	7	3	15	ND
	Máximo	7	18	40	ND
M.I. Yaziz, et.al.(1989)	Mínimo	5	2	ND	0
	Máximo	6.6	5	ND	0

Fuente: Diversos documentos, consultar bibliografía (elaboración propia)

De la tabla anterior, se pueden identificar algunas tendencias que se discuten en el capítulo 3.5.2.

### 3.5 Determinación de los parámetros a muestrear

Como resultado del apartado anterior y de las normas aplicables en México, se determinarán los parámetros bajo los que se realizará la caracterización de las muestras.

Los parámetros que se evaluarán en las muestras son:

- Físicos: turbiedad, color verdadero y sólidos disueltos totales
- Fisicoquímicos: pH y alcalinidad
- Microbiológicos: coliformes fecales

Los parámetros físicos se eligieron debido a que son un primer indicio de contaminación en el agua, los fisicoquímicos se eligieron para determinar la capacidad de amortiguamiento del agua pluvial. Asimismo se eligieron coliformes fecales como parámetros microbiológicos, ya que la presencia de estos es un indicio de que el consumo y uso de esta agua puede resultar nocivo para la salud.

A continuación se definen los parámetros que se evaluaron en este trabajo.

La turbiedad es una propiedad óptica de una muestra de agua que causa que los rayos de luz sean dispersados y absorbidos, en lugar de ser transmitidos en línea recta a través de la muestra. La turbiedad en el agua puede ser causada por la presencia de partículas suspendidas y disueltas. Este parámetro es útil para determinar el tipo de procesos y operaciones para la potabilización, ya que es un indicador de la eficiencia en el proceso de coagulación, sedimentación y filtración. (LISA, Manual de prácticas del laboratorio de tratamiento de aguas para consumo humano, 2017)

El color en el agua puede indicar la presencia de hierro y manganeso coloidal o en solución, por otro lado, puede ser causado por el contacto del agua con desechos orgánicos, hojas, maderas, raíces, etc. (LISA, Manual de prácticas del laboratorio de abastecimiento de agua potable, 2018).

El pH es uno de los parámetros más importantes de la calidad del agua, ya que, a pesar de que no afecta directamente a los consumidores, se debe tomar en cuenta para garantizar que la clarificación y desinfección del agua sean satisfactorias; por ejemplo, para que la desinfección con cloro sea eficaz, es preferible que el pH sea menor a 8. No obstante, el agua con un pH menor, será probablemente corrosiva, es por esto que en un sistema de abastecimiento de agua potable el pH del agua

debe estar controlado para reducir al mínimo la corrosión del sistema en las instalaciones domésticas (OMS, Guías para la calidad del agua potable, 2006).

La alcalinidad proporciona amortiguamiento para resistir los cambios bruscos de pH y también como indicador de materia orgánica. Además de lo anterior, tiene la capacidad de neutralizar los ácidos, esto debido a la presencia de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos (LISA, Manual de prácticas del laboratorio de tratamiento de aguas para consumo humano, 2017).

El análisis bacteriológico del agua es vital para la prevención de epidemias como resultado de la contaminación del agua, aunque este análisis no implica necesariamente la búsqueda directa de gérmenes patógenos. El control sanitario del agua se hace con métodos bacteriológicos para determinar la presencia de contaminación fecal. Los coliformes no solamente provienen del excremento humano sino también pueden encontrarse en los desechos de animales de sangre caliente, animales de sangre fría y en el suelo, por consiguiente, la presencia de coliformes en cuerpo de agua indica contaminación proveniente de residuos humanos, animales o erosión del suelo (LISA, Manual de prácticas del laboratorio de abastecimiento de agua potable, 2018).

### 3.5.1 Rangos esperados

Dados los resultados que se obtuvieron de otros análisis de la calidad del agua de lluvia citados en el punto 3.4, aunado a los datos de calidad del aire que se obtuvieron en el subcapítulo 3.1 se puede hacer una predicción de los rangos que se van a tener.

En cuanto al pH, se espera que esté entre los rangos permisibles por la NOM-127-SSA-1994, ya que la mayoría de los análisis consultados estuvieron dentro de ese rango, independientemente de la zona y el método de muestreo.

La turbiedad que se espera es mayor a la permitida en la NOM-127-SSA-1994, ya que todos los análisis consultados estuvieron por encima de 5 UTN. En cuanto a color, se espera estar dentro de lo establecido por la norma, ya que el agua no está en contacto con ninguna superficie que contenga materia orgánica o inorgánica.

Del mismo modo, se espera que existan coliformes fecales en las muestras, dado el entorno en el que se realizó el muestreo. Uno de los factores que podría ocasionar que existieran coliformes fecales sería que las muestras estuvieran expuestas durante mucho tiempo, esto puede ocurrir en el caso de que el evento sea en fin de semana. En los alrededores del sitio de muestreo hay presencia de heces fecales de algunos animales.

Se estima que cada año se emite al aire de la CDMX media tonelada de heces fecales. Si bien la mayoría de estos desechos provienen de perros y gatos, una parte considerable proviene de desechos humanos. Un ejemplo está en que si no hubiera luz en la urbe y si las heces fueran luminosas, las calles podrían ser alumbradas con las heces por las noches. Esto es posible, ya que la materia fecal expuesta, al deshidratarse se convierte en polvo que es arrastrado por el viento y así se convierte en un factor potencial de transmisión de enfermedades como el cólera (López, 2018).

### 3.5.2 Tendencias esperadas

Para tener una noción más clara del comportamiento de los parámetros que se van a caracterizar pertenecientes a un evento, se utilizó el análisis de M.I. Yaziz, *et.al.* en el documento “*Variations in rainwater quality from roof catchments*”, ya que el muestreo que se realizó fue el más parecido al que se hizo para este trabajo. Como ya se describió en el capítulo 3.4, se obtuvieron varias muestras durante la misma tormenta. En la tabla 3.9 y 3.10 se muestran los resultados de dos muestreos realizados para este análisis.

Tabla 3.9 Resultados de caracterización para el techo tipo 1 (acero galvanizado)

Parámetro	Unidad	S1	S2	S3	S4	S5
pH		6.6	6.6	6.6	6.5	6.4
Temperatura	°C	28.1	28.1	28	28	28
Turbiedad	UTN	22	18	15	12	10
Solidos disueltos totales	mg/l	28	24	20	16	13
Coliformes fecales	UFC/100 ml	4	8	4	0	0

Fuente: M.I. Yaziz “*Variations in rainwater quality from roof catchments*”.

Tabla 3.10 Resultados de caracterización para el techo tipo 2 (baldosa de concreto)

Parámetro	Unidad	S1	S2	S3	S4	S5
pH		6.9	6.9	6.9	6.9	6.8
Temperatura	°C	28.1	28.1	28.1	28.1	28.1
Turbiedad	UTN	56	47	41	33	24
Sólidos disueltos totales	mg/l	47	38	34	27	23
Coliformes fecales	UFC/100 ml	13	8	8	0	0

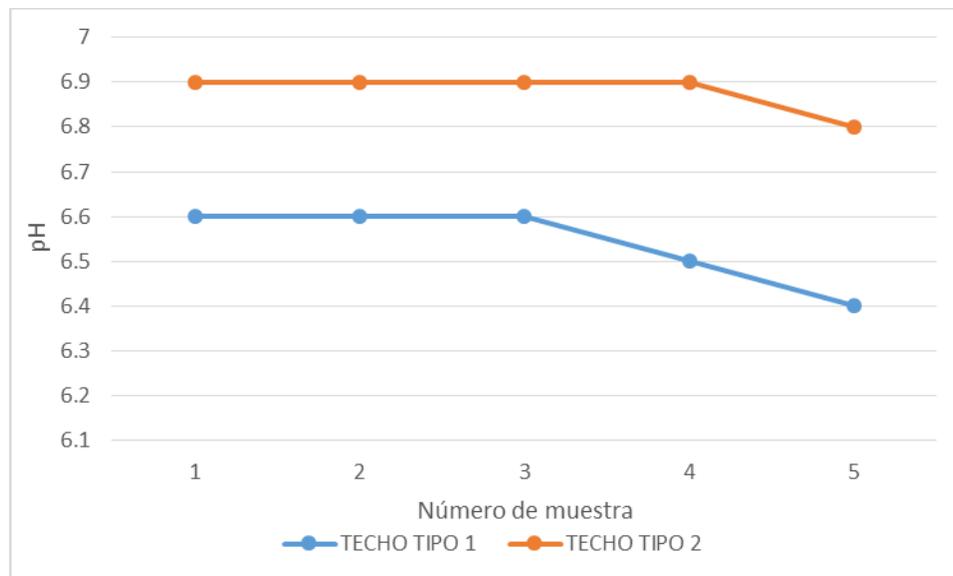
Fuente: M.I. Yaziz "Variations in rainwater quality from roof catchments."

Para tener una imagen más clara del comportamiento de los parámetros antes descritos, se realizaron las gráficas correspondientes a cada parámetro con el objetivo de observar la tendencia.

El comportamiento del pH es descendente conforme avanza la tormenta como se observa en la gráfica 3.11.

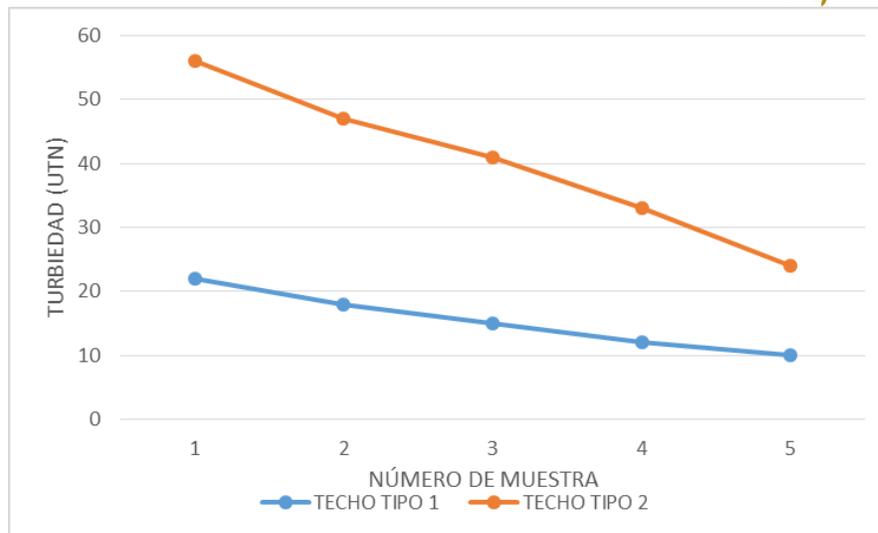
De la misma forma, ocurre con la turbiedad y los sólidos disueltos totales como se muestra en las gráficas 3.12 y 3.13 respectivamente.

Gráfica 3.11 Tendencia del pH en el techo tipo 1 y techo tipo 2



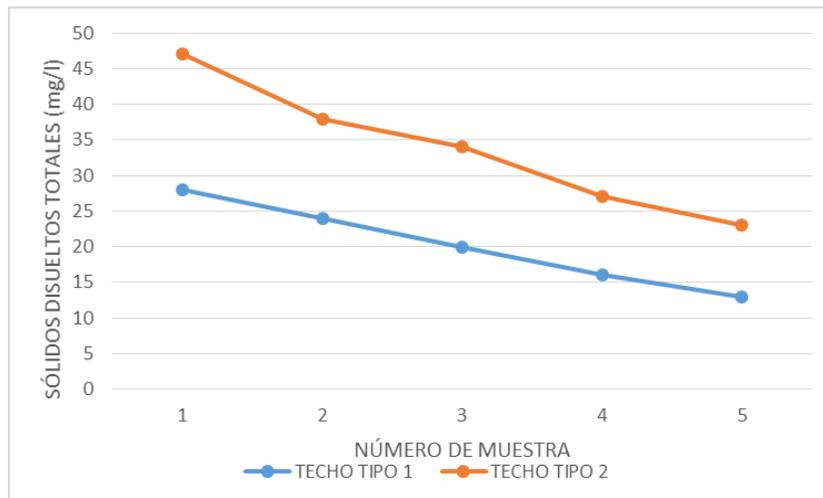
Fuente: Datos tomados de M.I. Yaziz "Variations in rainwater quality from roof catchments". Gráfica elaboración propia

Gráfica 3.12 Tendencia de la turbiedad en el techo tipo 1 y techo tipo 2



Fuente: Datos tomados de M.I. Yaziz "Variations in rainwater quality from roof catchments. Gráfica elaboración propia.

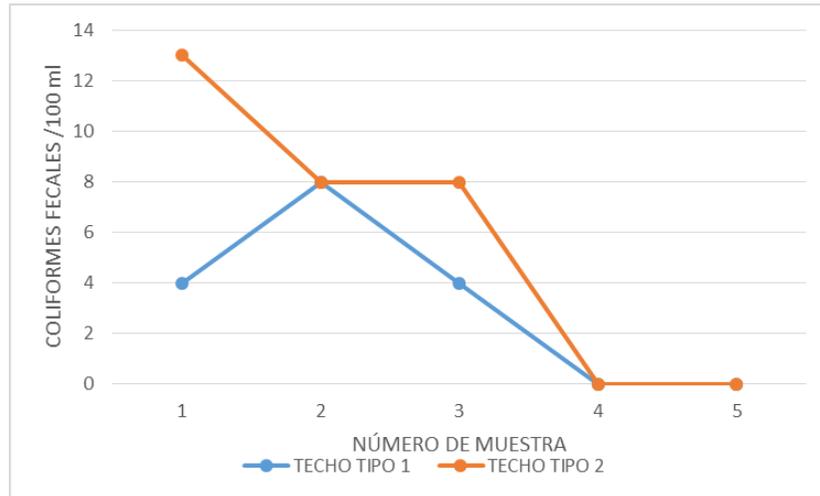
Gráfica 3.13 Tendencia de los sólidos disueltos totales en el techo tipo 1 y techo tipo 2



Fuente: Datos tomados de M.I. Yaziz "Variations in rainwater quality from roof catchments. Gráfica elaboración propia.

A diferencia de los otros parámetros, los coliformes fecales no obedecen una tendencia en particular. En la gráfica 3.14 se observa con más detalle la tendencia de los coliformes fecales en el techo tipo 1 y en el techo tipo 2.

Gráfica 3.14 Tendencia de los coliformes fecales en el techo tipo 1 y techo tipo 2



Fuente: Datos tomados de M.I. Yaziz "Variations in rainwater quality from roof catchments. Gráfica elaboración propia.

Como resultado de este estudio se puede estimar que todos los parámetros van a tener un comportamiento decreciente con respecto al primer valor, en tanto que los valores de los resultados de coliformes fecales no van a tener una tendencia marcada o un comportamiento necesariamente decreciente.

#### 4. Descripción de equipos a utilizar

En este capítulo se va a describir el prototipo del muestreador secuencial de agua de lluvia, diseñado por el Ingeniero Juan Antonio Hernández Magaña y construido en VIS CASA UNAM, así como un muestreador manual.

Ambos equipos se utilizaron para la toma de muestras, el muestreador secuencial se utilizó para la toma de las primeras muestras, mientras que el muestreador manual se utilizó para la toma de las últimas muestras.

##### 4.1 Muestreador secuencial de agua de lluvia

En la tesis "Planeación y diseño de un muestreador secuencial de agua pluvial" se mencionan algunos de los dispositivos que se han ideado a lo largo del tiempo,

todos ellos con un mismo fin, el muestreo de agua de lluvia. Con esto, los investigadores pretenden aprovechar el agua de lluvia o investigar sus características con diversos fines.

El muestreo de agua de lluvia se ha enfocado en dispositivos que captan el total de una lluvia en un periodo de tiempo determinado. Por el contrario, el muestreador secuencial de agua pluvial, segmenta una tormenta con el fin de poder estudiarla en diferentes momentos, se propusieron dos criterios para llevar a cabo esta segmentación y así obtener diferentes muestras, el muestreo por intervalos de tiempo y el muestreo por cantidad de lluvia o lámina de agua.

El criterio que se utilizó para la segmentación fue el de cantidad de lluvia, que consiste en obtener muestras con un volumen determinado, al completarse ese volumen, se cambiará a un nuevo recipiente. En la figura 4.1, se muestra un diagrama de flujo que indica el tipo de muestreo que se realizó.

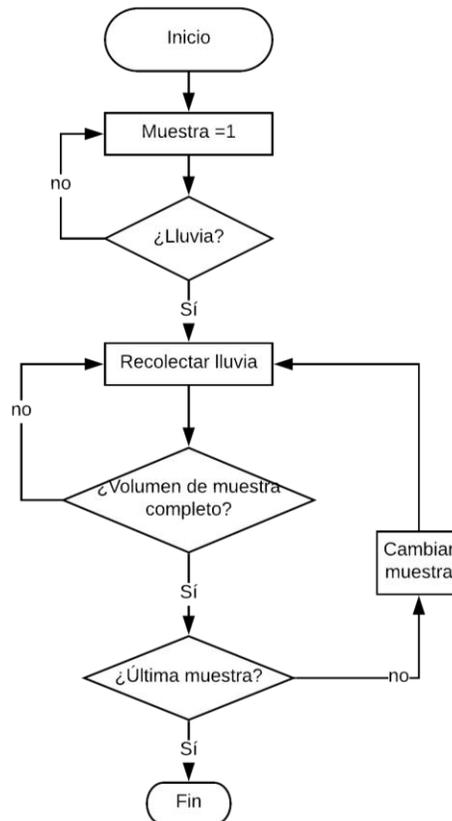


Figura 4.1. Diagrama de flujo del tipo de muestreo. FUENTE: Ingeniero Juan Antonio Sánchez Magaña  
"Planeación y diseño de un muestreador secuencial de agua pluvial"

En este tipo de muestreo se obtiene un número de muestras determinado en un tiempo variable, cada una de las muestras contiene el mismo volumen, la variabilidad del tiempo de llenado de cada muestra y del tiempo total es debida a la variación en la intensidad de la precipitación del evento y de los diferentes eventos muestreados.

El muestreador cumple con diferentes requerimientos, que son los siguientes:

- Número de muestras (18)
- Volumen de las muestras (500 ml)
- Hermetismo de las muestras
- Resguardo de las muestras

Asimismo, en su documento, el ingeniero Hernández Magaña explica en qué consiste el muestreador, que cuenta con una serie de recipientes agrupados en forma radial, cuyas tapas se encuentran conectadas a un múltiple perforado con forma de cilindro con un hueco al centro; el agua de la lluvia es colectada por el cono y a través de una pieza denominada distribuidor es conducida al múltiple que se encarga de conducir el agua a cada recipiente. Para llevar a cabo el cambio de recipiente, se requiere que la pieza central denominada distribuidor ubicada en el centro del múltiple gire y se posicione en cada uno de los agujeros destinados a los diferentes recipientes, de manera que cada que se alcanza el nivel de muestra en un recipiente el distribuidor avance a la siguiente posición y comience a llenarse una nueva muestra. El último recipiente contará con un sistema de excedencia a través del cual saldrá el agua que ya no sea posible almacenar.

El sistema debe ser accionado de manera electrónica mediante un software que controla motores o solenoides, ya sea por intervalos de tiempo o con el auxilio de electroniveles o sensores de llenado.

En la figura 4.2 se muestra un esquema del prototipo, y en la figura 4.3 se observa una foto real del prototipo colocado en el sitio de muestreo.



Figura 4.2 Esquema del prototipo del Secuenciador múltiple. Fuente: Ingeniero Juan Antonio Sánchez Magaña *“Planeación y diseño de un muestreador secuencial de agua pluvial”*



Figura 4.3 Muestreador secuencial de agua de lluvia colocado en el patio CIDI

## 4.2 Muestreador manual

Consiste en una superficie de captación en forma de embudo o cono, la cual se encuentra colocada en un tripie que le permite sostenerse y adaptarse a la superficie, de manera que el área de captación sea siempre horizontal, en el fondo o “punta” del cono el dispositivo cuenta con una válvula que permite coleccionar el agua en recipientes etiquetados, el proceso de muestreo es el siguiente:

1. Colocar el dispositivo en un lugar abierto sin obstrucción causada por árboles o edificios altos cercanos.
2. Colocar un recipiente abierto debajo de la válvula de descarga del dispositivo.
3. Con ayuda de un cronómetro medir el tiempo transcurrido a partir del inicio de la lluvia.
4. Una vez iniciada la lluvia, a cada intervalo de tiempo asignado (5 min, por ejemplo) abrir la válvula y descargar el agua en el recipiente.
5. Con el cono vacío, cerrar la válvula.
6. Tapar el frasco con la muestra.
7. Colocar un nuevo frasco debajo de la válvula.
8. Esperar que transcurra nuevamente el intervalo de tiempo requerido.
9. Repetir los pasos 4, 5, 6, 7 y 8 hasta que finalice el evento.
10. Al terminar la lluvia resguardar las muestras para su análisis.

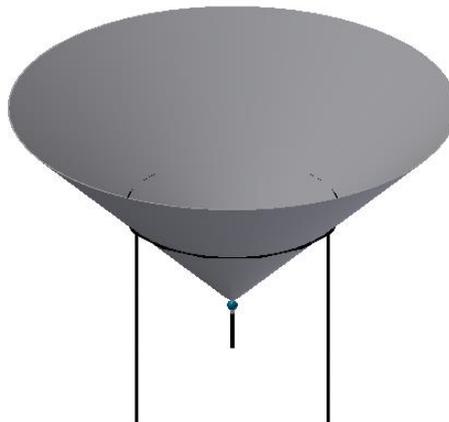


Figura 4.3. Esquema del prototipo de muestreador manual. Fuente: Ingeniero Juan Antonio Sánchez Magaña  
"Planeación y diseño de un muestreador secuencial de agua pluvial"

## 5. Programa de muestreo

El objetivo de contar con un programa de muestreo es que las personas involucradas en dicha actividad cuenten con un documento que integre las pautas para todo el procedimiento, en este caso desde la revisión de las aplicaciones web para predecir los eventos hasta la preservación de las muestras para su posterior caracterización.

## 5.1 Descripción del procedimiento

En este subcapítulo se va a describir el procedimiento para obtener muestras confiables, que permitan observar, sin alteraciones, los resultados. Como el muestreo se realizó de dos formas diferentes, en cada paso se explicará para ambos casos: usando el muestreador secuencial o el muestreador manual.

### 5.1.1 Revisión del pronóstico del tiempo

Como ya se mencionó en el capítulo 2, es muy productivo hacer una consulta constante de las aplicaciones de predicción del clima. Esto se hizo diariamente, para lograr un adecuado muestreo y poder cumplir con los objetivos del presente documento. Este procedimiento es el mismo para ambos muestreadores.

### 5.1.2 Limpieza del equipo

#### Muestreador secuencial

La limpieza del equipo es fundamental para contar con muestras confiables, es decir, para evitar que factores externos sesguen los resultados de la caracterización de las muestras. Consiste en lavar el cono, envases y el sistema de distribución con una esponja -que es utilizada únicamente para este fin-, jabón neutro y agua.

#### Muestreador manual

En el caso del muestreador manual únicamente se debe cuidar que el cono de captación esté limpio antes de cada evento. Esta limpieza se realiza de la misma forma que en el muestreador secuencial, con agua, esponja y jabón neutro.

### 5.1.3 Revisión de los circuitos y baterías

Este paso se realizó únicamente para el muestreador secuencial y consiste principalmente en revisar que la pila de 9 volts, que entrega energía a los circuitos

y la batería que alimenta al motor, cuenten con energía para que el equipo funcione adecuadamente.

#### 5.1.4 Pared de protección

Este paso se realiza únicamente para el muestreador secuencial. Como paso final, se debe colocar la pared que cubre el equipo desde la parte superior del cono hasta la base del equipo. La función de esta pared de protección radica en la preservación de los elementos electromecánicos y así evitar que puedan dañarse. En las figuras 5.1 se muestra el equipo sin la pared de protección y con la pared de protección, respectivamente.

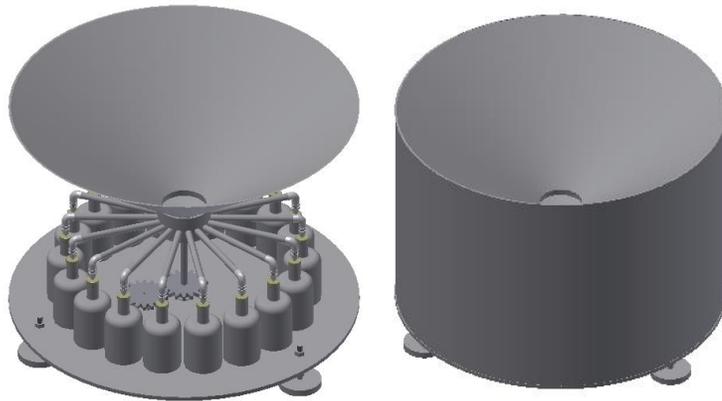


Figura 5.1 Equipo muestreador secuencial de agua pluvial con pared protectora y sin pared protectora. Fuente: Ingeniero Juan Antonio Sánchez Magaña "Planeación y diseño de un muestreador secuencial de agua pluvial"

#### 5.1.5 Recolección de muestras

##### Muestreador secuencial

Para este momento existen dos opciones: la primera, es que la tormenta haya terminado y que no se hayan llenado todos los envases y la segunda opción, que todos los envases se hayan llenado y que la tormenta continúe. En cualquiera de las dos opciones se debe seguir el mismo procedimiento, a diferencia de la segunda opción, se debe cuidar que no entre agua en el equipo, para evitar fallas.

### Muestreador manual

En el caso del muestreador manual la recolección de muestras se hará durante la tormenta, por lo que a los envases se les puso una marca exactamente a los 500 ml para facilitar el muestreo. El envase debe ser cambiado cada vez que el agua llegue a dicha marca.

### 5.1.6 Etiquetado

En el subcapítulo 5.2 se especifica el tipo de etiqueta y cómo se debe llenar. Para ambos casos es la misma etiqueta. En la figura 5.2, se muestra un ejemplo de etiquetado de los envases.

### Muestreador secuencial

El etiquetado de los envases se sugiere se haga llevando un orden, partiendo del envase uno hasta el último envase, para evitar confusiones.

### Muestreador manual

Se sugiere que el etiquetado se haga después de quitar el envase que se ha llenado hasta la marca.



FIGURA 5.2 Etiquetado de envases

### 5.1.7 Transporte de las muestras

Para el transporte de las muestras no se requiere un resguardo especial, únicamente verificar que los envases estén bien cerrados; lo anterior debido a la cercanía del sitio de muestreo con el laboratorio en donde se realizó la caracterización.

### 5.1.8 Caracterización

En el subcapítulo 3.5 se definieron los parámetros a muestrear, en este subcapítulo se va a indicar cómo se realizará la medición de éstos parámetros y los equipos y materiales con los que se realizarán.

#### Determinación de coliformes fecales

La primera prueba que se le hará a las muestras será la de presencia de coliformes fecales, esto para evitar que la muestra se contamine durante la evaluación de los otros parámetros y que los resultados no sean confiables.

Para este parámetro se utilizó el método Simplate, éste consta de una charola y un medio de cultivo. El procedimiento es sencillo, consta de agregar 9 ml de agua destilada al cultivo para hidratarlo como se muestra en la figura 5.3



Figura 5.3 Medio de cultivo hidratado y charola

Una vez que se tiene el medio de cultivo hidratado, se agrega 1 ml de muestra a la charola, posteriormente sobre la muestra se agrega el cultivo, se cierra la charola y

se mezcla haciendo movimientos circulares hasta que todos los pocillos queden llenos con la solución, en la figura 5.4 se puede ver con más detalle el procedimiento.



FIGURA 5.4 Procedimiento de mezcla de muestra con medio de cultivo

En caso de que exista exceso dentro de la charola se deberá inclinar hacia el cojín y esperar a que se absorba como se muestra en la figura 5.5



FIGURA 5.5 Charolas bien mezcladas

Lo siguiente es ingresar la charola a la incubadora, la cual debe encontrarse a una temperatura de 35°C durante 24 horas. Después de ese periodo se puede determinar, con ayuda de una luz UV, la presencia de coliformes fecales. La presencia de coliformes se identificará cuando bajo la luz UV la charola muestre un

cambio de color ya sea en los pocillos o en el cojín absorbente, como se muestra en la figura 5.6.

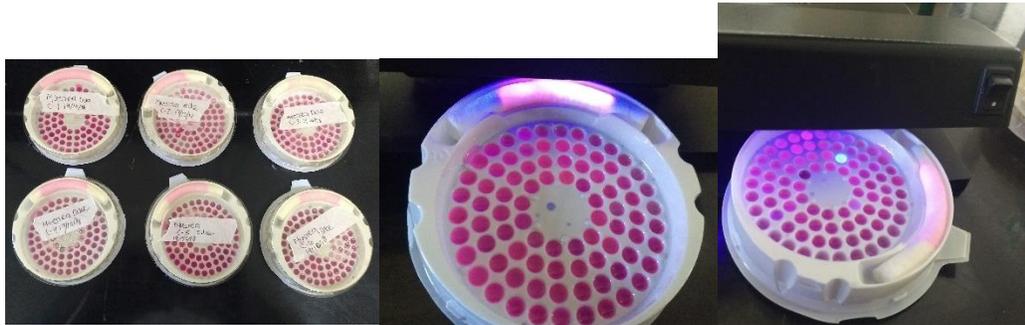


FIGURA 5.6 Charolas bajo luz UV

### pH, temperatura, conductividad de sólidos disueltos totales

Estos parámetros van a ser medidos con ayuda de un multiparamétrico. Se vaciará una cantidad de muestra en un vaso de precipitados para facilitar la toma de datos, ya que la boquilla de los envases es muy pequeña y resulta difícil hacerlo directamente. En la figura 5.7 se muestra el aparato multiparamétrico utilizado.



Figura 5.7 Multiparamétrico portátil

### Turbiedad

La turbiedad de las muestras se tomó con ayuda de un turbidímetro, éste cuenta con celdas que deben ser llenadas con la muestra hasta tres cuartos de su

capacidad, es necesario que la muestra se agite previamente para obtener un buen mezclado. Los resultados que arroja este equipo están en unidades de turbiedad nefelométricas (UTN). En la figura 5.8 se muestra el turbidímetro utilizado.



FIGURA 5.8 Turbidímetro



### Color

El color se midió con ayuda del colorímetro, la lectura de este resultado es por comparación de una muestra que representa el cero en la escala de platino cobalto con la muestra tomada en sitio. Esta comparación se hace con ayuda de unos discos graduados.

### Alcalinidad

La prueba de alcalinidad se realizó conforme a la norma NMX-036-SCFI-2001, que establece que al agregar fenolftaleína o anaranjado de metilo a la muestra ésta debe presentar una coloración rosa, en el caso de la fenolftaleína o naranja en el caso del

anaranjado de metilo. Una vez que aparece dicha coloración se debe titular con disolución de hidróxido de sodio 0.02N hasta que la muestra vire de color y anotar en cada caso, los mililitros de hidróxido de sodio utilizados. Una vez realizado lo anterior, con los valores obtenidos se realizan los siguientes cálculos:

Para anaranjado de metilo (Alcalinidad total como  $\text{CaCO}_3$ :

$$\text{Alcalinidad total como } \text{CaCO}_3 \text{ en } \frac{\text{mg}}{\text{l}} = \frac{A * N}{V} * 50 * 1000$$

Donde :

- A: volumen total gastado de ácido en la titulación
- N: la normalidad de la disolución de ácido
- V: Volumen de la muestra en ml
- 50: factor de conversión de eq/l a mg/l
- 1000: factor para convertir de ml a litros

En la figura 5.9 se observa el resultado de alcalinidad.



FIGURA 5.9 Resultados de alcalinidad total

## 5.2 Etiquetado

Como se verá en el capítulo 5.4, el etiquetado de las muestras debe hacerse correctamente para evitar que las muestras se revuelvan y no sea posible identificarlas posteriormente, dado que se tendrán varias muestras por evento.

Para el etiquetado de los envases se propone una numeración que permita identificar de cada muestra, tanto el evento como el número de envase que se está manejando, lo que permitirá determinar el cambio en la calidad del agua durante la tormenta de estudio. Además incluirá datos como fecha, hora, nombre de quien

toma la muestra y caracteriza el agua; datos que serán tomados en sitio, como pH y temperatura. La figura 5.10 muestra un ejemplo del etiquetado.

En cuanto al campo de llenado de número de muestra se propone colocar un indicador en el primer campo que señale el evento (A, B, C, D...) y como segundo campo el número de muestra que se toma (1,2,3,...) ambos separados por un guion medio; es decir, si es el primer evento y la quinta muestra, se colocará A-5.

<p><b>Muestra</b></p> <p>#</p> <hr/> <p>AGUA DE LLUVIA</p> <p>TESINA</p> <p>Ing. Dulce María Ceja</p> <p>Reyes</p> <p>CIDI</p>	FECHA	
	HORA	
	NOMBRE DE QUIEN MUESTREA	
	PH	
	TEMPERATURA	

Figura 5.10 Etiqueta para cada envase

### 5.3 Formatos

Es importante contar con formatos que faciliten y aseguren la preservación de las muestras, así como la confiabilidad de los resultados. Dado lo anterior, se trabajó un formato de cadena de custodia que se muestra en la figura 5.11.

Esta cadena de custodia incluye información desde la toma de la muestra hasta la caracterización. En la parte inferior de este documento, se incluye una guía de cómo se deben llenar algunos espacios, para que el vaciado de los datos sea sencillo.

Como se vio en el subcapítulo 5.2, para el etiquetado de los envases se elaboró un formato, para que todas las muestras en todos los eventos pudieran identificarse adecuadamente.



## 5.4 Cadena de custodia

El proceso de control y vigilancia de muestreo es esencial para asegurar la integridad de la muestra desde su recolección hasta el informe de resultado y es fundamental para demostrar ante terceros el control y confiabilidad de la muestra (ITD, 2016).

Para mejorar el procedimiento de cadena de custodia, se consideraron algunas recomendaciones que hacen los Métodos Estándar (Estándar Methods for the Examination of Water and Waste Water).

- a. **Etiquetado.** Se requiere el uso de etiquetas para prevenir que las muestras se pierdan o se revuelvan, éstas deben incluir: número de muestra, tipo de muestra, nombre de quién muestrea, fecha y hora de muestreo, lugar de muestreo y preservación de las muestras. Para el muestreo realizado el etiquetado de se describió en el subcapítulo 5.2.
- b. **Sellado.** El sellado de las muestras se realiza para evitar que las muestras se manipulen sin autorización. Para efectos de este muestreo este sellado no se realizó.
- c. **Registro de cadena de custodia.** Acompaña a cada grupo de muestras, debe incluir: número de muestras, firma de quien muestrea, fecha, hora y lugar de muestreo, tipo de muestra, requerimientos para la preservación de muestras y las firmas de las personas que tomaron posesión de dichas muestras e incluso las fechas y horas en las que esto sucedió. En el subcapítulo 5.3 se explica el formato utilizado para este muestreo.

Todos los muestreos y caracterización del agua pluvial fueron realizados por la suscrita.

En el anexo I se pueden observar los formatos de cadena de custodia para todos los muestreos.

## 6. Análisis y discusión de resultados

En este capítulo se va a realizar un análisis de los resultados obtenidos, considerando los rangos y las tendencias esperados que se mostraron en los capítulos 3.5.1 y 3.5.2, respectivamente.

Para el análisis de los resultados de caracterización de las muestras es necesario contar con un parámetro base que permita identificar si la calidad del agua que se está muestreando es buena o no. Para este análisis se tomaron como datos base los de la NOM-127-SSA1-1994 y de la OMS, que indican la calidad del agua para uso y consumo humano.

### 6.1 Concordancia con los rangos y tendencias esperados

Los primeros muestreos que se hicieron no fueron lo suficientemente abundantes para indicar una tendencia clara, pero los últimos dos muestreos (E y F) permitieron observar desde la caracterización que las tendencias encontradas y las esperadas fueron similares.

A continuación, en la figura 6.1, se muestra la comparación entre la tendencia esperada y la tendencia obtenida en el caso de pH.

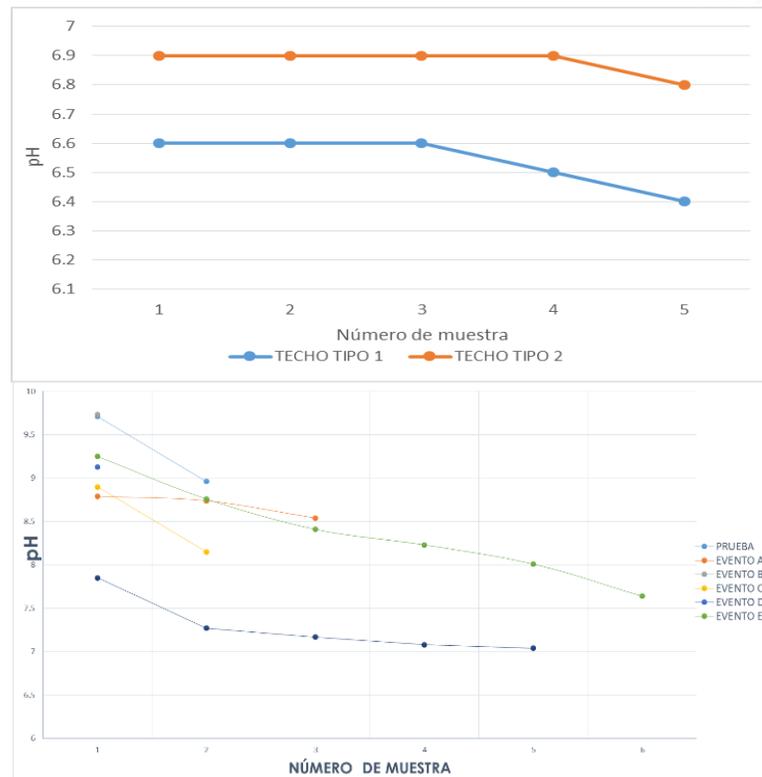


Figura 6.1. Comparación tendencias esperadas con tendencias obtenidas. Tendencias esperadas obtenidas de M.I. Yaziz "Variations in rainwater quality from roof catchments"

Estas tendencias se repiten en casi todos los parámetros, como se verá más adelante en el capítulo 6.2; excepto en coliformes fecales, ya que el comportamiento de los coliformes no obedece a los contaminantes atmosféricos. Puede que las muestras se contaminen a través del arrastre debido a las corrientes de viento.

## 6.2 Tendencias encontradas

En la tabla 6.2 se observan los datos obtenidos de la caracterización de las muestras. En el caso del pH, la tendencia de todas las muestras es decreciente a partir de la primera. En cuanto a la tendencia de la conductividad eléctrica o sólidos disueltos totales, es decreciente, y cumple con lo que se esperaba, ya que durante la tormenta la atmósfera se lava y esto puede ocasionar que las partículas que contiene disminuyan a lo largo del evento.

Tabla 6.2 Datos obtenidos de la caracterización de las muestras

EVENTO PRUEBA							
Parámetro	Unidad	Prueba-1	Prueba - 2				
pH		9.71	8.96				
Temperatura	°C	19.3	19.9				
Conductividad de sólidos disueltos totales	mg/l	ND	ND				
Turbiedad	UTN	6.39	7.46				
Color	UCV (Pt. Co.)	ND	ND				
Alcalinidad total	mg/l CaCO <sub>3</sub>	ND	ND				
EVENTO A							
Parámetro	Unidad	A-1	A-2	A-3			
pH		8.79	8.74	8.54			
Temperatura	°C	17.00	17.60	19.50			
Conductividad de sólidos disueltos totales	mg/l	110.00	60.00	90.00			
Turbiedad	UTN	31.80	14.10	8.50			
Color	UCV (Pt. Co.)	ND	ND	ND			
Alcalinidad total	mg/l CaCO <sub>3</sub>	44.00	76.00	ND			
EVENTO B							
Parámetro	Unidad	B-1					
pH		9.73					
Temperatura	°C	24.10					
Conductividad de sólidos disueltos totales	mg/l	30.00					
Turbiedad	UTN	19.70					
Color	UCV (Pt. Co.)	ND					
Alcalinidad total	mg/l CaCO <sub>3</sub>	32.00					
EVENTO C							
Parámetro	Unidad	C-1	C-2				
pH		8.90	8.15				
Temperatura	°C	19.40	19.30				
Conductividad de sólidos disueltos totales	mg/l	20.00	20.00				
Turbiedad	UTN	33.70	26.30				
Color	UCV (Pt. Co.)	20.00	20.00				
Alcalinidad total	mg/l CaCO <sub>3</sub>	20.00	12.00				
EVENTO D							
Parámetro	Unidad	D-1					
pH		9.13					
Temperatura	°C	18.80					
Conductividad de sólidos disueltos totales	mg/l	20.00					
Turbiedad	UTN	7.40					
Color	UCV (Pt. Co.)	10.00					
Alcalinidad total	mg/l CaCO <sub>3</sub>	16.00					
EVENTO E							
Parámetro	Unidad	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6
pH		9.25	8.76	8.41	8.23	8.01	7.64
Temperatura	°C	19.40	19.10	19.10	19.00	18.80	19.50
Conductividad de sólidos disueltos totales	mg/l	30.00	20.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Turbiedad	UTN	38.20	14.90	8.22	5.07	3.15	2.14
Color	UCV (Pt. Co.)	20.00	15.00	5.00	5.00	0.00	0.00
Alcalinidad total	mg/l CaCO <sub>3</sub>	60.00	56.00	52.00	44.00	40.00	32.00
EVENTO F							
Parámetro	Unidad	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	
pH		7.85	7.27	7.17	7.08	7.04	
Temperatura	°C	16.70	16.20	16.80	16.80	17.00	
Conductividad de sólidos disueltos totales	mg/l	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	
Turbiedad	UTN	20.80	8.64	9.85	9.79	10.30	
Color	UCV (Pt. Co.)	20.00	10.00	10.00	10.00	15.00	
Alcalinidad total	mg/l CaCO <sub>3</sub>	32.00	20.00	18.00	16.00	16.00	

FUENTE: Resultados obtenidos en laboratorio. Elaboración propia

### 6.3 Comparación con lo establecido en la NOM-127-SSA-1994

En los subcapítulos 3.3.1 y 3.3.2, se abordan los límites permisibles en cuanto a características físicas, químicas y biológicas del agua para consumo humano. Así mismo, se explicó que la NOM-127-SSA-1994 (NOM) es la norma aplicable en todo México y es de carácter obligatorio, mientras que la OMS ofrece únicamente una guía.

El rango de pH que se espera para agua de consumo humano es de 6.5 a 8.5 (Salud, 1994). En la figura 6.3 se ilustra con una gráfica el resultado de la caracterización de las muestras. En el rango establecido por la NOM, se encuentran únicamente tres muestreos que son el evento C, E y F. En el evento C únicamente la muestra dos cumple con los límites de la NOM, en cambio en el evento E, a partir de la muestra número tres se encuentra dentro de los límites. De esta forma, el evento E se encuentra por completo dentro de los límites que establece la NOM, es decir, las cinco muestras cumplen con la norma bajo este parámetro.

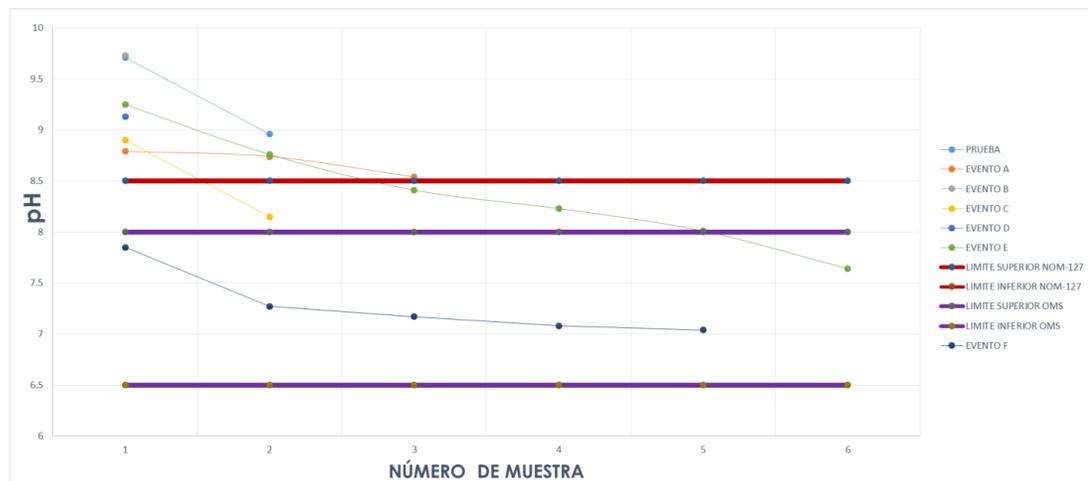


Figura 6.3 Resultados de pH

La NOM establece un límite de 20 UC verdadero en la escala platino cobalto. Como se observa en la figura 6.4, todas las muestras están en el límite o por debajo de las 20 UC. Esto significa que, respecto a este parámetro, el agua tiene calidad para el consumo humano.

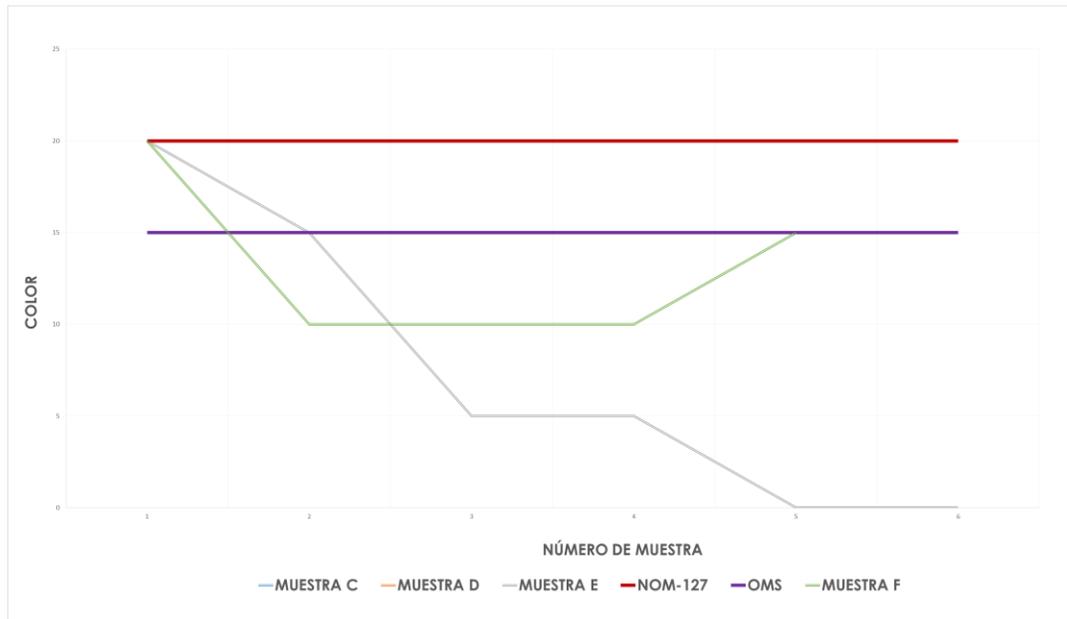


Figura 6.4 Resultados de color en las muestras

A diferencia de los parámetros antes comparados, el único evento que entra dentro del límite que establece de 5 UTN es el evento E con las últimas dos muestras como se muestra en la figura 6.5. Para hacer uso del agua pluvial bajo este parámetro como agua para consumo humano se requerirá un sistema de tratamiento previo a su uso.

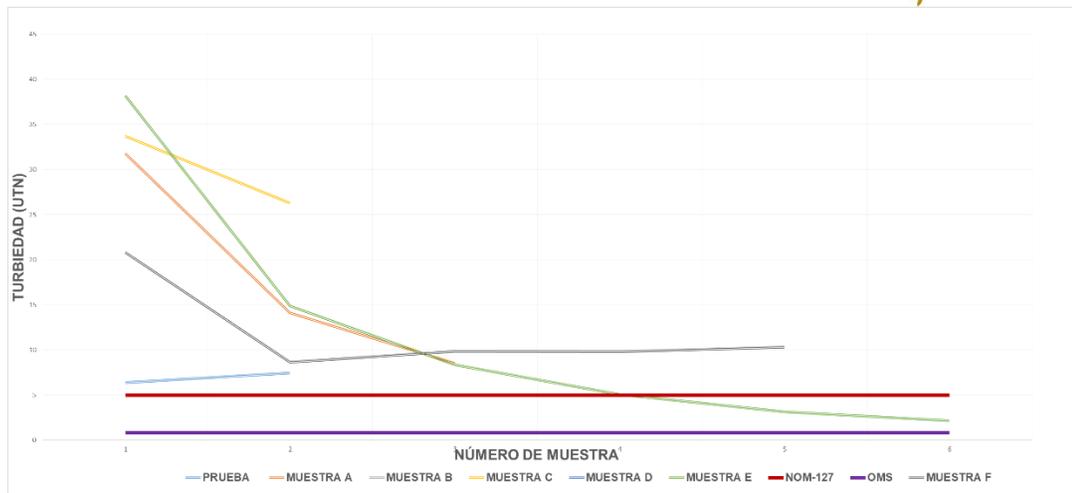


Figura 6.5 Resultados de turbiedad en las muestras

La NOM establece un límite máximo de sólidos disueltos totales de 1000 mg/l. Como se muestra en la figura 6.6 ninguna de las muestras supera dicho límite.

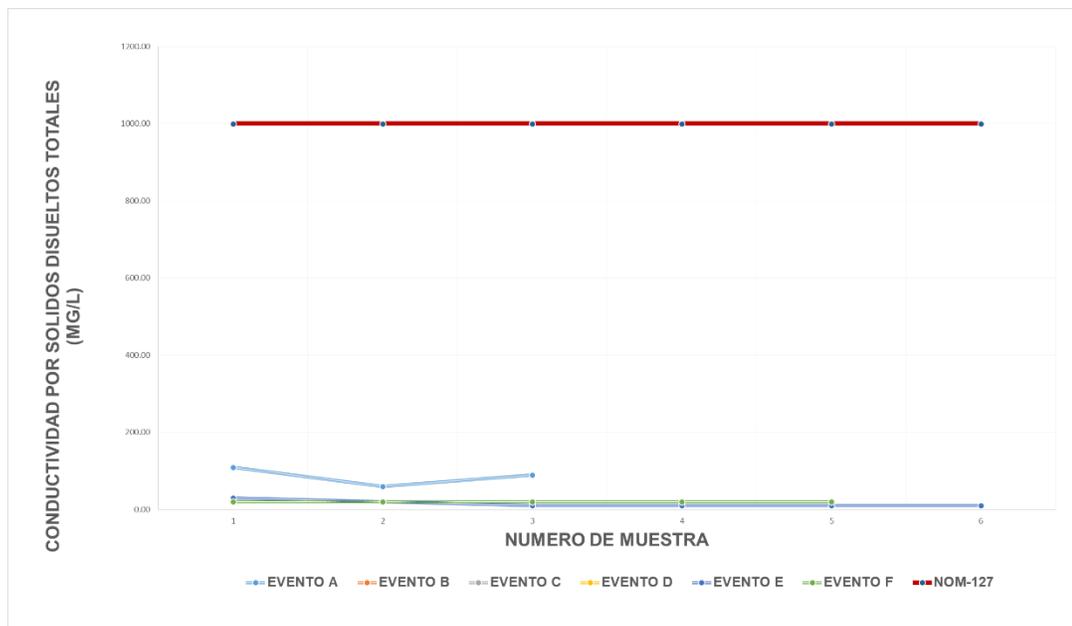


Figura 6.6 Resultados de sólidos disueltos totales en las muestras

La NOM no establece un límite permisible en cuanto a alcalinidad, pero establece algunos rangos en los que se puede clasificar al agua en cuanto a que tan alcalinas

sean. En la tabla 6.7 se muestra una tabla que contiene los rangos y la alcalinidad en mg/l de CaCO<sub>3</sub>.

Tabla 6.7 Rangos de alcalinidad

Rango	Alcalinidad (mg/l CaCO <sub>3</sub> )
Mínimo aceptable	20
Pobremente amortiguadas	20 a 25
Moderadamente amortiguadas	25 a 75
Muy amortiguadas	>75

Fuente: Manual de prácticas del laboratorio de tratamiento de agua para consumo humano.

En la figura 6.8, se muestran los resultados de caracterización por alcalinidad de las muestras, en esta se puede observar que el muestreo A y el E se encuentran en el rango de las aguas moderadamente amortiguadas, mientras que el muestreo C se encuentra por debajo del mínimo aceptable.

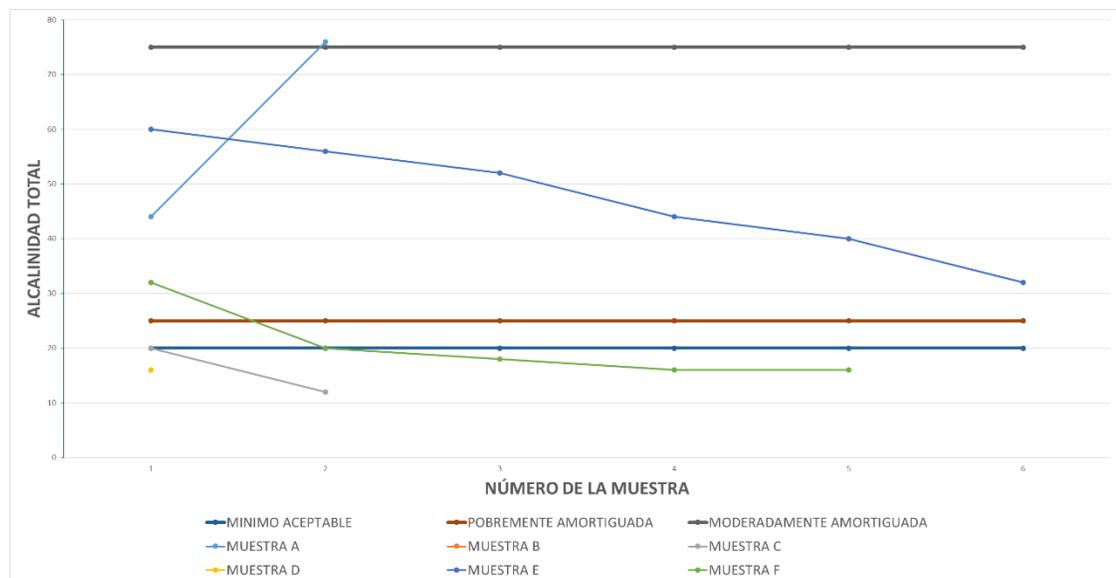


Figura 6.8 Resultados de Alcalinidad total en las muestras

En contraste con los demás parámetros, la NOM no tiene tolerancia en cuanto a coliformes fecales, por lo que el límite es cero. Ninguna de las muestras caracterizadas cumplió con lo establecido en la NOM. Como se observa en la figura 6.9, no existe una tendencia en cuanto a la presencia de coliformes fecales.

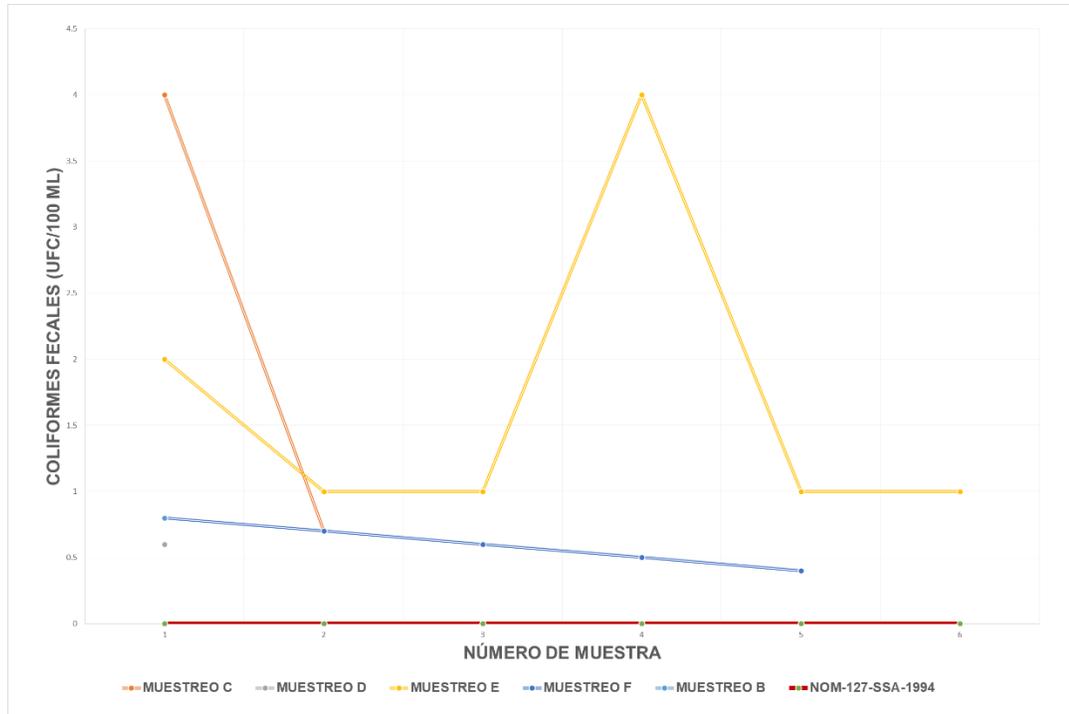


Figura 6.8 Resultados de coliformes fecales en las muestras

## 7. Conclusiones y recomendaciones

Debido al constante crecimiento de la población en México, la demanda de agua ha aumentado y seguirá aumentando en los próximos años. Se sabe que existe un buen volumen de agua de lluvia aprovechable, como se vio en el capítulo 1, es por esto, que se han desarrollado algunas investigaciones que permiten conocer la calidad del agua de lluvia. Dado todo lo anterior, la captación de agua de lluvia puede ser una opción viable para abastecer de agua a algunas comunidades con desabasto.

En este sentido, *VIS CASA UNAM*, es un proyecto que integra la captación de agua de lluvia para su aprovechamiento. Cuenta con un tanque de almacenamiento de agua pluvial y uno mixto; este último tiene como objetivo que, en periodo de sequía, se llene con agua proveniente de la red para así satisfacer la demanda de agua para el W.C. Además, se tiene contemplado a futuro integrar un sistema de tratamiento de agua, para poder darle otros usos.

Partiendo de esto, el análisis hidrológico de la zona de estudio es muy importante, ya que es necesario conocer cómo y cuándo llueve, con esto, se puede conocer el potencial de aprovechamiento de agua en la zona. En la ubicación actual del prototipo de vivienda *VIS CASA UNAM*, se puede tener un aprovechamiento de hasta 5786.77 litros en un año. En este caso, las mayores precipitaciones ocurren durante los meses de julio, agosto y septiembre, por lo que el muestreo en esos meses podría arrojar datos más completos y ayudaría a realizar un análisis de tendencias más sólido.

En cuanto a las características de la calidad del agua de lluvia en la zona, no están muy alejadas a los límites permisibles que se mencionan en el capítulo 3.3.1, aunque la calidad del agua no es para consumo humano, ya que puede contener coliformes fecales.

La calidad del agua de lluvia en la zona de estudio, permitiría que el agua que se llegue a captar tenga usos que no involucren el contacto directo o de órganos

internos de los seres humanos; es decir, recomendable para riego, para lavar el piso y para el W.C.

Los parámetros establecidos para la caracterización del agua de lluvia definidos en el capítulo 3, permitieron identificar después de la caracterización de la muestra si ésta estaba dentro de los límites permisibles de la NOM. En caso de que se requiera captar el agua para su utilización en el hogar, se deberá identificar qué usos es posible dar al agua captada.

En cuanto al pH, únicamente el evento F estuvo dentro de los límites permisibles por completo, ya que de los demás eventos sólo algunas de las muestras entraron en el rango de pH establecido por la NOM-127-SSA1-1994. Es importante tener un control del pH del agua, ya que en caso de que se requiera un tratamiento previo a su uso, se necesita conocer esta característica para saber si se puede realizar el tratamiento directamente o es necesario ajustar el pH.

El color en todas las muestras estuvo dentro del límite permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994, es decir, sin tomar en cuenta todos los demás parámetros, todas las muestras son aceptables para el usuario.

A diferencia de los resultados de color, los de turbiedad mostraron lo contrario, ya que solo uno de los eventos cuenta con dos muestras que están dentro del límite de 5 UTN que marca la norma, esto indica que contienen sólidos suspendidos, en caso de que se requiriera tratamiento del agua para su consumo, sería necesario buscar alguna opción para quitar la turbiedad en el agua.

La presencia de sólidos disueltos totales en todas las muestras está muy por debajo de los 1000 mg/l que establece la NOM-127-SSA1-1994. Esto quiere decir que es posible que no se necesite un tratamiento para esta característica.

La presencia de coliformes en las muestras fue constante, como se explicó en el capítulo 3, existe presencia de partículas de origen fecal en el aire, por lo tanto era de esperarse que las muestras tuvieran presencia de coliformes fecales. El límite permisible en cuanto a este parámetro en la norma es cero, por lo que sí se requiere tratamiento del agua sí se va a utilizar para actividades en las que el líquido esté en

contacto directo con la piel o con los órganos internos de las personas. El agua de lluvia no es apta para consumo humano.

Finalmente, los parámetros que se caracterizaron, permitieron validar la hipótesis del presente trabajo, ya que la calidad del agua de lluvia varía a lo largo de una tormenta, como se demostró en el capítulo 6. Esto deja abierta una posibilidad a realizar un nuevo muestreo en los meses de julio, agosto y septiembre, para verificar que las tendencias encontradas en el presente trabajo permanezcan o si es el caso, que en algún momento de la tormenta, los parámetros tengan un comportamiento casi constante y a partir de éste comportamiento diseñar un sistema de tratamiento de agua pluvial para que sea factible de utilizar en otras actividades diarias.

## Bibliografía

- Amparo, M. A. (2007). El Agua en la Atmósfera. *Revista Ciencia, Academia Mexicana de Ciencias*.
- Beatrice Nnene Uba, O. A. (2000). *Rainwater quality from different roof catchments in the Port Harcourt district, Rivers State, Nigeria*. Nigeria: IWA Publishing.
- CLICOM. (2018). *CLICOM*. Obtenido de <http://clicom-mex.cicese.mx/>
- Climático, I. N. (2018). *SEMARNAT*.
- CONAGUA. (2008). *Estadísticas del agua en México*.
- CONAGUA. (2016). *NUMERAGUA*.
- CONAGUA. (2017). *Estadísticas del Agua en México*.
- Fernández B., F. (2011). *Habita-Mueble: Propuesta Conceptual de Vivienda*. UNAM: Facultad de Arquitectura.
- Guerrero, T. y. (2009). *El agua en la Ciudad de México*. (C. 9. línea], Ed.) Obtenido de <http://www.revistaciencias.unam.mx/es/43-revistas/revista-ciencias-94/203-el-agua-en-la-ciudad-de-mexico.html>
- Guerrero, V. M. (2014). Pronóstico estocástico de la población mexicana utilizando modelos de datos funcionales. *Revista internacional de estadística y geografía*, 18-33.
- INEGI. (2015). *Cuéntame INEGI*. Obtenido de <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/poblacion/>
- INEGI. (2015). *INEGI censos y conteo de población y vivienda*.
- Ingeniería, R. C. (2018). *Real Academia de Ingeniería*. Obtenido de <http://diccionario.raing.es/es/lema/disdr%C3%B3metro>
- ITD. (08 de Noviembre de 2016). *Protocolo de toma de muestras de agua residual*. Obtenido de Instituto de Toxicología de la Defensa: <https://www.google.com/search?q=PROTOCOLO+DE+TOMA+DE+MUESTRAS+DE+AGUA+RESIDUAL+INSTITUTO+DE+TOXICOLOGIA+DE+LA+DEFENSA&ie=utf-8&oe=utf-8&client=firefox-b-ab#>
- Ju Young Lee, G. B. (2012). *Quality of roof-harvested rainwater- Comparison of different roofing materials*. Korea: ELSEVIER.

- LISA. (2017). *Manual de prácticas del laboratorio de tratamiento de aguas para consumo humano*. Obtenido de Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental: <http://dicyg.fi-c.unam.mx:8080/labsanitaria/contenidos>
- LISA. (2018). *Manual de prácticas del laboratorio de abastecimiento de agua potable*. Obtenido de Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental: <http://dicyg.fi-c.unam.mx:8080/labsanitaria/contenidos>
- López, I. A. (4 de enero de 2018). *Fecalismo, grave problema en la Ciudad de México*. Obtenido de Dirección General de Comunicación Social: [http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2018\\_004.html](http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2018_004.html)
- M.I. Yaziz, H. G. (1989). *Variations in rainwater quiality from roof catchments*. Malaysia: 1989 Maxwell Pergamon Macmillan plc.
- Magaña, J. A. (2018). *Planeación y diseño de un muestreador secuencial de agua pluvial*. CDMX: UNAM.
- Naturales, S. d. (11 de agosto de 2017). *gob.mx*. Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/atmosfera>
- OMS. (2006). *Guías para la calidad del agua potable*.
- OMS. (2018). *Guías para la calidad del agua de consumo humano*. Ginebra 2011.
- RUOA. (2018). *Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos*. Obtenido de <https://www.ruoa.unam.mx/>
- Salud, S. d. (1994). *NOM-127-SSA-1994*. Obtenido de <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html>
- Santiago, I. E. (2018). *Diseño de las intalaciones para el suministro de agua de la Vivienda Industrializada Sustentable (VIS CASA UNAM) y la alternativa de captación de agua pluvial como complemento del suministro de agua*. CDMX: UNAM.
- SEMARNAT. (2013). *CALIDAD DEL AIRE UNA PRÁCTICA DE VIDA*.
- UNAM. (2018). *Observatorio Hidrológico en tiempo real* . Obtenido de <https://www.oh-iiunam.mx/semaforo.html>
- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), G. d.-C. (2010). Obtenido de Red del Agua UNAM: [http://www.agua.unam.mx/grupos\\_analisis\\_agualluvia.html](http://www.agua.unam.mx/grupos_analisis_agualluvia.html)
- Velázquez, H. G. (2012). *Sistema de captación y aprovechamiento pluvial para un eco barrio de la Cd. de México*.

Villegas, B. G. (2013). *Caracterización del agua de lluvia captada en una edificación para su aprovechamiento con fines de sustentabilidad hídrica*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería, UNAM.















