



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**POTABILIZACIÓN DE AGUA DE LLUVIA A TRAVÉS DE UN SISTEMA  
DE BARRERAS MÚLTIPLES**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

**ULISES MOLINA VALENCIA**



**CDMX**

**2019**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

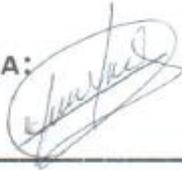
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Profesor: ALFONSO DURÁN MORENO  
**VOCAL:** Profesor: SERGIO ADRIÁN GARCÍA GONZÁLEZ  
**SECRETARIO:** Profesor: ALMA CONCEPCIÓN CHÁVEZ MEJÍA  
**1er. SUPLENTE:** Profesor: ALEJANDRA MENDOZA CAMPOS  
**2° SUPLENTE:** Profesor: DAVID FRAGOSO OSORIO

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:** LABORATORIO DE INGENIERÍA AMBIENTAL (LIA) DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA-UNAM.

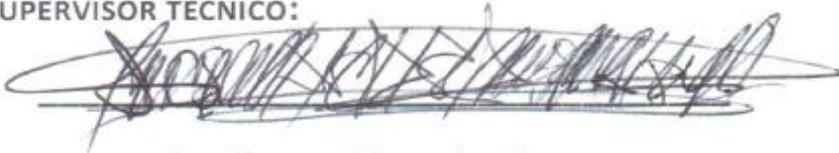
**ASESOR DEL TEMA:**



---

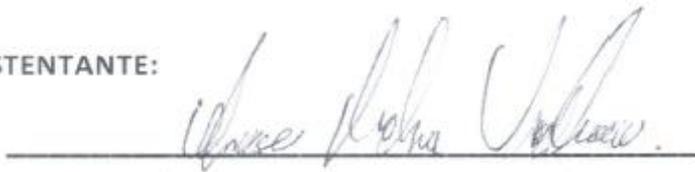
**DRA. ALMA CONCEPCIÓN CHÁVEZ MEJÍA**

**SUPERVISOR TÉCNICO:**



**DR. RAFAEL MAGAÑA LÓPEZ**

**SUSTENTANTE:**



**ULISES MOLINA VALENCIA**

## **AGRADECIMIENTOS**

AL INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM POR PERMITIRME HACER USO DE SUS INSTALACIONES EN EL DESARROLLO DE MI TESIS DE LICENCIATURA Y POR LOS CONOCIMIENTOS ADQUIRIDOS A LO LARGO DE MI ESTANCIA, ASÍ COMO AL PROYECTO DE “ASEGURAMIENTO DE LA CANTIDAD Y CALIDAD DEL AGUA ALMACENADA EN PROYECTOS DE CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA EN MÉXICO” II-UNAM PROY. 6335 POR EL SOPORTE ECONÓMICO.

# ÍNDICE

<b>1. RESUMEN .....</b>	<b>9</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
<b>3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....</b>	<b>15</b>
<b>4. MARCO DE REFERENCIA.....</b>	<b>17</b>
4.1 Derecho humano al agua.....	17
4.2 Balance hídrico en México.....	20
4.3 Plantas potabilizadoras instaladas y en operación en México.....	22
4.4 Normatividad mexicana.....	25
4.5 Calidad del agua.....	29
4.5.1 <i>Parámetros biológicos</i> .....	31
4.5.2 <i>Parámetros físicos</i> .....	32
4.5.3 <i>Parámetros químicos</i> .....	33
4.6 Oportunidades en la captación de agua de lluvia.....	34
4.7 Antecedentes históricos de la captación de agua de lluvia en México.....	35
4.8 Situación actual de la captación de agua de lluvia en México.....	37
4.9 Efecto de los materiales de techado en la calidad del agua de lluvia captada	39
4.10 Barreras para el proceso de potabilización del agua de lluvia captada.....	40
4.10.1 <i>Filtro de arena</i> .....	41
4.10.2 <i>Filtro de carbón activado</i> .....	41
4.10.3 <i>Filtro de carbón activado impregnado en plata coloidal</i> .....	41
4.10.4 <i>Filtro KDF</i> .....	42
4.10.5 <i>Radiación ultravioleta (UV)</i> .....	42

<b>5. OBJETIVOS</b> .....	44
5.1 General.....	44
5.2 Particulares.....	44
5.3 Alcances y limitaciones.....	44
<b>6. METODOLOGÍA</b> .....	45
6.1 Sitio de muestreo.....	46
6.2 Condiciones climatológicas.....	47
6.3 Sitio de muestreo.....	48
6.4 Muestreo .....	48
6.5 Caracterización del agua de lluvia.....	50
6.6 Evaluación del sistema piloto de potabilización para el agua de lluvia captada	56
6.7 Operación de la planta para la potabilización del agua de lluvia.....	57
6.8 Mantenimiento y reemplazo de los cartuchos del sistema de potabilización	60
6.9 Análisis de varianza (ANOVA) .....	61
6.10 Balance de masa.....	62
<b>7. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	65
7.1 Aplicación del análisis de varianza a los resultados .....	77
7.2 Balance de masa.....	79
<b>8. CONCLUSIONES</b> .....	<b>81</b>
<b>9. REFERENCIAS</b> .....	<b>82</b>
<b>Anexo 1. Análisis estadístico</b> .....	<b>92</b>
Anexo 1.1 Resultados obtenido en el análisis de varianza (ANOVA) .....	95

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen del Objetivo número 6: Agua y Saneamiento de la La Agenda 2030 y los ODS de la ONU.....	18
Tabla 2. Procesos empleados en las plantas potabilizadoras en México.....	24
Tabla 3. Función de los filtros de acuerdo con su medio filtrante.....	43
Tabla 4. Características de los filtros utilizados en el pretratamiento y desinfección. .....	56
Tabla 5. Mantenimiento mínimo de las barreras que conforman el sistema de potabilización.....	60
Tabla 6. Recapitulación del estudio de varianza para ésta investigación.....	78
Tabla 7. Recapitulación de gramos de contaminantes removidos, obtenidos del balance de masa a 87 días de operación del sistema de potabilización. Porcentaje de remoción en paréntesis. ....	79
Tabla 8. Análisis de varianza de coliformes totales en el pretratamiento. ....	95
Tabla 9. Análisis de varianza de coliformes totales en el filtro PC. ....	95
Tabla 10. Análisis de varianza de coliformes totales en el filtro KDF. ....	95
Tabla 11. Análisis de varianza de turbiedad en el pretratamiento. ....	96
Tabla 12. Análisis de varianza de turbiedad en el filtro PC. ....	96
Tabla 13. Análisis de varianza de turbiedad en el filtro KDF. ....	96
Tabla 14. Análisis de varianza de turbiedad en el filtro UV. ....	97
Tabla 15. Análisis de varianza de la absorbancia $UV_{254}$ en el pretratamiento.....	97
Tabla 16. Análisis de varianza de absorbancia $UV_{254}$ en el filtro PC.....	97
Tabla 17. Análisis de varianza de absorbancia $UV_{254}$ en el filtro KDF.....	98
Tabla 18. Análisis de varianza de absorbancia $UV_{254}$ en el filtro UV.....	98

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Balance hídrico para México.....	21
Figura 2. Balance hídrico para la Ciudad de México.....	22
Figura 3. Área de recolección de agua de un chultún o cisterna maya.....	37
Figura 4. Localización de la AMC en la Ciudad de México..	46
Figura 5. Clima de la alcaldía de Tlalpan y ubicación de la AMC.....	47
Figura 6. Ubicación del sitio de muestreo. Fuente: Elaboración propia.....	48
Figura 7. Cisterna de almacenamiento del agua de lluvia, ubicada en el interior del auditorio "Galileo Galilei".....	49
Figura 8. Espectrofotómetro DR 5000 para la determinación de absorbancia UV <sub>254</sub> y color en las muestras de agua.....	50
Figura 9. Determinación de alcalinidad total por cambio de color de amarillo pajizo a rojo canela mediante titulación de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> en las muestras de agua.....	51
Figura 10. Viales digeridos de la marca HACH para determinación de COT (lado izquierdo) y DQO (lado derecho) en las muestras de agua. ....	52
Figura 11. Kit de pruebas Simplate Total Plate Count Color Indicator para la determinación de coliformes fecales y totales en las muestras de agua.....	52
Figura 12. Multiparámetro de la marca OAKTON empleado para la determinación de conductividad eléctrica, SDT y pH.....	53
Figura 13. Determinación de dureza total y dureza debida al ión calcio en las muestras de agua.....	54
Figura 14. Determinación de SDT y SST en las muestras de agua. ....	55
Figura 15. Turbidímetro HACH 2100N empleado en la determinación de turbiedad en las muestras de agua. ....	55
Figura 16. Sistema piloto para la potabilización del agua de lluvia captada en la AMC. ....	57
Figura 17. Medición de flujo en la barrera UV <sub>254</sub> del sistema de potabilización.....	58
Figura 18. Toma de muestra para la determinación de los parámetros coliformes totales y coliformes fecales. ....	59
Figura 19. Esquema general de trabajo. ....	45

Figura 20. Cartucho de CA saturado con sólidos no disueltos. ....	61
Figura 21. Digrama de flujo del sistema de potabilización. ....	63
Figura 22. Comparación de Absorbancia UV254 a la entrada del sistema de potabilización y salida en cada barrera. ....	66
Figura 23. Comparación de Alcalinidad a la entrada del sistema de potabilización y salida en cada barrera.....	67
Figura 24. Comparación de Carbono Orgánico Total a la entrada del sistema de potabilización y salida en cada barrera. ....	68
Figura 25. Comparación de Demanda Química de Oxígeno a la entrada del sistema de potabilización y salida en cada barrera. ....	69
Figura 26. Comparación de Coliformes Totales a la entrada del sistema de potabilización y salida en cada barrera. ....	70
Figura 27. Comparación de Color verdadero a la entrada del sistema de potabilización y salida en cada barrera. ....	71
Figura 28. Comparación de Conductividad Eléctrica a la entrada del sistema de potabilización y salida en cada barrera. ....	72
Figura 29. Comparación de Sólidos Disueltos Totales a la entrada del sistema de potabilización y salida en cada barrera. ....	73
Figura 30. Comparación de Dureza Total a la entrada del sistema de potabilización y salida en cada barrera. ....	74
Figura 31. Comparación de pH a la entrada del sistema de potabilización y salida en cada barrera. ....	75
Figura 32. Comparación de Turbiedad a la entrada del sistema de potabilización y salida en cada barrera.....	76
Figura 33. Correlación de Turbiedad y coliformes totales a la entrada del sistema de potabilización y salida en cada barrera. ....	77

# 1. RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó la confiabilidad de una planta piloto conformada por barreras múltiples para potabilizar agua de lluvia para fines de consumo humano.

Se construyó un sistema piloto con el fin de determinar el funcionamiento y la operación para la potabilización del agua de lluvia que cumpla con la normatividad nacional aplicable. El tren lo integra una etapa de pretratamiento a base de un filtro de arena (FA) y un filtro de carbón activado (CA) y una etapa de desinfección compuesto por tres sistemas que operan en paralelo, a saber, filtro de carbón activado impregnado de plata coloidal (PC), filtro *Kinetic Degradation Fluxion* (KDF) y un sistema de luz ultravioleta (UV<sub>254</sub>), teniendo como base la remoción de algunos parámetros establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 y otros de interés ambiental, tales como absorbancia UV<sub>254</sub>, carbono orgánico total (COT) y demanda química de oxígeno (DQO).

El periodo de estudio se efectuó entre los meses de julio de 2017 a enero de 2018 (6 meses) donde se evaluó la variabilidad de la calidad del agua de lluvia almacenada, mientras que la operación del tren de potabilización operó durante cinco meses, tiempo en el cual se potabilizó 8 L/d de agua en todo el sistema. Para su evaluación se efectuaron 22 muestreos semanales en el reservorio destinado para el almacenamiento del agua de lluvia captada localizado en el interior del auditorio "*Galileo Galilei*" de la Academia Mexicana de Ciencias (AMC).

Con base en los resultados se establece los parámetros de color verdadero, sólidos disueltos totales (SDT) y turbiedad son los que mayormente varían a lo largo del periodo de lluvia una vez que han sido captada y almacenada y que inciden de manera negativa sobre la calidad del agua. El FA permite amortiguar la variabilidad de alcalinidad total, dureza total y de los SDT, mientras que en la salida del filtro CA se logró remover el 41.1% de color y hasta 7.93% de turbiedad. Con relación a la etapa de desinfección, se alcanzaron eficiencias de remoción para color verdadero de 29.6%, 17.65% y 33%, mientras que la turbiedad se removió en un 33.34%, 23.81% y 32.56%, para PC, KDF y UV<sub>254</sub> respectivamente.

En relación a los microorganismos evaluados, todos los sistemas de desinfección fueron capaces de remover en su totalidad el contenido de coliformes fecales.

El análisis de varianza (ANOVA) permitió evidenciar que en parámetros como absorbancia  $UV_{254}$  y coliformes totales existen diferencias significativas entre la calidad del agua de lluvia a la entrada y a la salida de todas las barreras del sistema de potabilización con un nivel de confianza de 95%. Por otro lado, para el caso de la turbiedad se puede afirmar que no encontrando diferencia significativa entre la calidad del agua de lluvia a la entrada y salida de todas las barreras de potabilización bajo el mismo criterio de prueba.

El balance de masa aplicado a las propiedades intesivas del agua de lluvia potabilizada permitió determinar que la barrera con mejor desempeño a lo largo de 87 días de operación en la etapa de pretratamiento fue filtro CA, logrando remover en promedio el 17.25% de alcalinidad total, 40.23% COT, 67.52% de DQO, 10.37% de dureza debida al ión calcio, 9.89% de dureza total y 9.52% de SDT. Por su parte, el filtro FA logró remover en promedio de alcalinidad total (17.25%), DQO (58.24%) y dureza total (5.2%). Por su lado, durante la etapa de desinfección las remociones de estos parámetros fueron irrelevantes, el filtro PC fue capaz de remover en promedio sólo el 0.99% de alcalinidad total, 78.43% de DQO, 16.43% de dureza al calcio, 19.4% de dureza total y el 4.45% de SDT. El filtro KDF removi6 5.37% de alcalinidad total, 4.04% de dureza al calcio y 6.02% de dureza total; mientras que la luz  $UV_{254}$  alcanz6 remoci6n del 17.57% de alcalinidad total, 84.31% de DQO, 13.79% de dureza al calcio y 19.15% de dureza total, sin embargo, durante esta etapa se garantiza la inocuidad del agua en t6rminos microbiol6gicos.

De esta manera, el sistema compuesto por un pretratamiento a base de un filtro CA y una barrera de desinfecci6n como un filtro PC o UV fue capaz de producir agua de calidad acorde a los par6metros evaluados en dicha investigaci6n.

## 2. INTRODUCCIÓN

En México, el agua es reconocida como un tema estratégico y de seguridad nacional, siendo el contenido central del desarrollo de políticas ambientales y económicas (de la Peña, *et al.*, 2013). Lograr que todos los cuerpos de agua superficiales y subterráneos del país conserven, mejoren su calidad, aporten caudales óptimos para cubrir las necesidades de la población ya que es relevante para la contribución en el desarrollo económico del país. Por ello, es importante controlar la carga de contaminantes contenida dentro de la descargas de agua residual y garantizar que los habitantes tengan acceso a una forma segura de agua, evitando problemas de salud, ambientales y lograr una gestión integral de los recursos hídricos (de la Peña, *et al.*, 2003).

La presión en temas relacionados con el agua es creciente. Los defectos en el acceso, suministro y saneamiento de agua, así como poblaciones en crecimiento desmedido, variabilidad de las lluvias y la contaminación se han combinado para convertir al agua en uno de los mayores riesgos para el progreso económico, erradicación de la pobreza y desarrollo sostenible (UNESCO, 2016). Existen tres aspectos principales que caracterizan la escasez de agua: la falta de disponibilidad física de agua para satisfacer la demanda, el nivel de desarrollo de las infraestructuras que controlan el almacenamiento, acceso, distribución y la capacidad institucional para aportar los servicios de agua necesarios (FAO, 2013).

Si el mundo continúa el camino actual, las proyecciones sugieren un déficit del 40% en la disponibilidad de agua en el año 2030. Las consecuencias de tal problema son locales, nacionales, transfronterizas, regionales y globales, que serán desproporcionadamente sentidas por la población con limitación de acceso a recursos básicos. Abordar estos problemas plantea uno de los mayores desafíos que enfrenta el mundo (ONU & WBG, 2018). La reducción en la disponibilidad del agua es la principal consecuencia del cambio climático en el país, allí la importancia de enfocar acciones y reflexiones hacia la relación entre la ciencia y política para debatir acerca de los efectos que enfrenta el sector.

El crecimiento demográfico y el cambio climático ha sometido a la naturaleza a una gran presión, lo que obliga a buscar nuevas estrategias que contribuyan a minimizar los impactos ambientales, explorar y plantear vínculos de comunicación entre los que generan el conocimiento y quienes diseñan las políticas públicas en materia de agua (Águila-Arreola, 2017).

Según aumenta la demanda humana de agua se intensifica la competencia entre los distintos sectores que la usan. Su escasez se hace aparente de formas muy distintas, tal como la insuficiencia de agua para cubrir todas las demandas, incluyendo las correspondientes a los caudales ecológicos. Algunos de los síntomas son degradación severa del ambiente, reducción del nivel del agua subterránea y distribución del agua que favorece a unos grupos frente a otros (FAO, 2013).

De manera general, existen cuatro razones para el desperdicio del agua en México: deficiencias en la operación e infraestructura para la captación y distribución del agua, malos hábitos de consumo en los usuarios, falta de cultura en reúso, separación y poco aprovechamiento de agua de lluvia. Paradójicamente, el 33.7% de toda la lluvia que cae en la Ciudad de México va directamente al drenaje (Agua.org, 2018), limitando con ello otros usos. Si fuera posible recuperar todo este volumen, con menor carga de contaminantes que el agua residual, sería posible cubrir las necesidades mínimas diarias de 220,320 personas (Monroy, 2017). No obstante, en el país no existe la cultura de plantear otras posibilidades para cubrir la necesidad de agua.

A lo largo de los años se ha buscado implementar una nueva cultura del agua que pretende ir mucho más lejos, y ya no solamente generar conciencia en los ciudadanos sobre su adecuado uso en los hogares. Los problemas en relación a ésta son diversos y todos de alta relevancia que exigen de manera urgente la realización de cambios en todos los niveles para un manejo sostenible del recurso. En la Resolución 64/292, la Asamblea General de las Naciones Unidas busca una nueva cultura del agua para garantizar el acceso al agua como derecho humano, e incluye también la necesidad de una gestión de la demanda con un enfoque integral, prevenir la contaminación, mantenimiento, remediación de la salud de los ecosistemas, impulsar la participación ciudadana en el manejo del recurso y

mantener una racionalidad económica en los usos de negocios privados que permita la sustentabilidad y la equidad social (CEMDA, 2006). En México este derecho fundamental se incorporó a la Constitución Pol en febrero de 2012 y el constituyente permante, ordenó al Congreso de la Unión expedir la Ley General de Aguas (LGA) para implementar y garantizar los contenidos de este derecho (Martínez & Velasco, 2015).

En realidad es necesario buscar formas alternativas y/o complementarias para el abastecimiento de agua potable, y parece que el agua de lluvia es relativamente segura para uso doméstico (por lo general está libre de contaminantes físicos y químicos como arsénico, color, dureza, sales, sólidos en suspensión, plaguicidas y plomo), aunque no se recomienda beber agua a menos que se potabilice (Gould, 1999) debido a que existen fuentes puntuales de contaminación. Se debe estar consciente de los riesgos a la salud de los contaminantes físicos, microbiológicos y químicos para que de esta manera se pueda implementar medidas apropiadas para evitar beber agua contaminada (Campisano, *et al.*, 2017).

En años recientes, la captación de agua de lluvia ha recibido atención como una de las fuentes alternativas de agua más prometedoras, que dependiendo de la intensidad de la precipitación pudiera satisfacer parcialmente su creciente demanda mundial (Ibne-Bashar, *et al.*, 2018). Además, con una gestión adecuada se podría reducir la crisis alimentaria en países con economías emergentes, como México (Helmreich & Horn, 2009).

Son cuatro factores importantes para el diseño de sistemas de captación del agua lluvia (SCALL); área de captación, capacidad de almacenamiento, demanda y precipitación pluvial (cantidad, distribución y frecuencia). Se ha demostrado que dichos sistemas son capaces de abastecer a poblaciones de varios miles de personas (Anaya, 1998), tal como se mencionó anteriormente, con un mantenimiento regular del sistema y del reservorio de almacenamiento ayudaría a obtener agua de buena calidad (Abdulla & Al-Shareef, 2009) para diversos usos como en actividades productivas a pequeña escala, agricultura, diversas actividades domésticas, para propósitos ambientales, y un correcto tratamiento de potabilización para el consumo humano (Mwenge-Kahinda & Taigbenu, 2011).

Para el diseño del sistema de potabilización es preciso conocer la calidad del agua y su variabilidad con detalle para seleccionar los procesos útiles que brinden las características adecuadas para posteriores fines. En el caso particular de consumo humano en México para definir la calidad lo ideal sería que, para cualquier tipo de agua como mínimo se determinen todos los parámetros que conforman la NOM 127-SSA1-1994. Para garantizar el cumplimiento de dicha norma es necesario combinar una serie de procesos que sean capaces de remover los compuestos considerados como contaminantes y que estén presentes en la fuente de suministro.

Los métodos para proteger y mejorar la calidad del agua de lluvia deben tener un diseño que busquen remover agentes que no sean adecuados para el uso posterior que se desea efectuar, así como un adecuado tratamiento que junto con la operación y el mantenimiento ayuden a reducir los niveles de contaminación y asegurar la calidad del agua para uso y consumo humano. El tratamiento de potabilización debe emplearse cuando se sospeche de contaminación del agua de lluvia y no existe otra fuente de agua potable disponible (Gould, 1999).

Una estrategia comprobada capaz de reducir eficazmente sustancias indeseables en el agua de lluvia es la tecnología de filtración en múltiples etapas (FiME), que consiste en la combinación de dos o más procesos de filtración (OPS, 2005), siendo capaz de remover progresivamente contaminantes para producir agua con fines de consumo humano.

En general, se ha establecido la conveniencia de separar primero el material de mayor tamaño y gradualmente remover el material de menor tamaño, que incluye microorganismos, para finalizar en la desinfección. La última barrera en el tratamiento de agua contribuye a eliminar los contaminantes a límites aceptables, y para que sea efectiva requiere que las etapas previas remuevan a contaminantes que puedan interferir con los mecanismos de desinfección (Vernaza, 1999). Bajo dicho contexto, fue desarrollada esta investigación.

### 3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El agua es necesaria para todas las formas de vida en el planeta, al constituir un compuesto crucial para el funcionamiento de los ecosistemas y la provisión de servicios ambientales para sobrevivir y también es un factor estratégico para el desarrollo del país. El principal aporte de agua en la cuenca del Valle de México proviene de la lluvia, que si se aprovechara se dejaría de importar agua de otras cuencas, reduciendo así la dependencia del agua entubada durante cuatro o cinco meses aproximadamente al año, lo que implicaría un ahorro económico y energético para la ciudad y para las familias que la habitan. Con medidas de este tipo se reduciría de manera adicional también la extracción de agua del subsuelo (IAGUA, 2017).

En la Academia Mexicana de Ciencias (AMC) el abastecimiento de agua se realiza por medio de pipas, resultando un método ineficiente, insostenible y extremadamente costoso, en comparación con el suministro de agua potable por parte de la alcaldía. En una semana las personas que laboran consumen alrededor de 16 m<sup>3</sup> de agua, correspondiente a una dotación semanal de dos pipas (10 m<sup>3</sup> cada una). De manera adicional, el servicio tiene un costo de \$70 por cada unidad, es decir \$8.75 por m<sup>3</sup> de agua. La AMC se emplea para la realización de conferencias, eventos culturales y exposiciones es necesario adquirir agua con comercializadores, donde, en dichos casos se consumen en promedio cuatro pipas por cada día de evento, con duración promedio de dos días, alcanzando aproximadamente 64 m<sup>3</sup> por evento, con un costo promedio de \$500 cada pipa, es decir \$62.5 por m<sup>3</sup>. En un año la AMC consume cerca de 1,600 m<sup>3</sup> de agua y gasta un poco más de \$55,000. No obstante, también cuenta con un sistema de captación de agua de lluvia, así como con un reservorio con capacidad de 130 m<sup>3</sup>. A pesar de ello, el agua captada solamente es utilizada para riego de áreas verdes y no para consumo humano, ya que no se cuenta con un sistema de potabilización del agua para éste fin (Sámamo, 2017).

La problemática de ésta investigación partió del interés por estudiar el potencial de aprovechamiento del agua de lluvia captada en la AMC como fuente alternativa para consumo y uso humano a partir de la determinación de sus propiedades fisicoquímicas y microbiológicas.

Adicionalmente, no se cuenta con datos de calidad del agua de lluvia captada para diseñar un sistema de potabilización. De esta manera, garantizar la calidad del agua para el propósito final y cumplir la normatividad nacional aplicable en la actualidad, además de fortalecer la captación pluvial como parte fundamental de una solución integral al problema de obtención, reúso y suministro de agua en México que corresponden a los fines del presente trabajo.

# 4. MARCO DE REFERENCIA

## 4.1 Derecho humano al agua

Los objetivos de Desarrollo Sostenible en su meta 6.1. establece, que el agua es una parte fundamental de los derechos humanos, busca motivar a los países empleando planes y programas para garantizar que todas las personas tengan acceso a este vital recurso (Trejo & Alvarez, 2007).

El derecho humano al agua, existe, ya que el agua es vital y esencial para la vida (Scanlon, *et al.*, 2004). La Asamblea General de las Naciones Unidas (2010) explícitamente reconoció mediante la resolución 64/242 que el derecho humano al agua y al saneamiento, haciendo hincapié en que el agua potable limpia y el saneamiento son indispensables para una vida humana digna.

En esta resolución se establece que:

- El abastecimiento de agua por persona debe ser suficiente y continuo para el uso personal y doméstico. Los usos incluyen el agua destinada para beber, preparación de alimentos, higiene personal y la limpieza del hogar.
- El agua necesaria para el uso personal y doméstico, debe ser saludable, es decir, libre de microorganismos, sustancias químicas y peligros radiológicos que puedan representar una amenaza para la salud humana.
- El agua debe presentar un color, olor y sabor aceptables para ambos usos, personal y doméstico.
- Físicamente accesible. De acuerdo con la OMS y la ONU (2008), la fuente de agua debe encontrarse a menos de 1,000 metros del hogar.

La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) colocan los problemas relacionados con la calidad del agua en la primera línea de la acción internacional mediante el establecimiento del Objetivo 6, que pretende

específicamente garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos (UNESCO & PHI, 2015).

La Tabla 1 muestra en resumen el Objetivo numeral 6, que pretende garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua, así como del saneamiento para todos, para hacer frente y responder a los desafíos asociados con los problemas apremiantes relacionados con la calidad del agua.

**Tabla 1. Resumen del Objetivo número 6: Agua y Saneamiento de la La Agenda 2030 y los ODS de la ONU.**  
Fuente: UNESCO & PHI, 2015.

<b>OBJETIVO NÚMERO 6: AGUA Y SANEAMIENTO</b>	<b>META</b>	<b>GARANTIZAR LA DISPONIBILIDAD Y LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL AGUA Y EL SANEAMIENTO PARA TODOS.</b>
	6.1	Lograr el acceso universal y equitativo al agua potable.
	6.2	Lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todos y poner fin a la defecación al aire libre.
	6.3	Mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos.
	6.4	Uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua.
	6.5	Implementar la gestión integrada de los recursos hídricos en todos los niveles.
	6.6	Proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua.

La ONU busca lograr el acceso universal y equitativo al agua potable a un precio asequible<sup>1</sup>. Asimismo busca mejorar la calidad del agua, mediante la minimización de la emisión de productos químicos y de materiales peligrosos, eliminando el vertimiento ilegal, reduciendo a la mitad el porcentaje de agua residual sin tratar, aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial. Por otro lado, busca aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores, asegurar la sostenibilidad de la extracción, el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a su escasez y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta del recurso.

<sup>1</sup> La Real Academia Española (2017) define a asequible como: que puede conseguirse o alcanzarse.

De acuerdo a lo anterior, se planea que se logre con la cooperación internacional y apoyo prestado a los países en desarrollo para la creación de programas relativos al agua y el saneamiento, como los de captación de agua o desalinización, uso eficiente de los recursos hídricos, tratamiento de aguas residuales, reciclado y tecnologías de reutilización.

México se enfrenta al grave problema del desabasto de agua potable, de hecho, el INEGI (2016) reportó que de 31,374,724 hogares en el país 29,048,251 (92.6%) cuentan con dotación de agua. De esos, el 73.79% reciben agua diariamente, el 15.86% cada tercer día, 6.21% dos veces por semana y 4.14% una vez por semana.

En el año 2016 se extrajeron 216 mil 593 millones de metros cúbicos de agua que, comparados con los 175 mil 245 extraídos en 2003, representan un incremento de 24%. Lo anterior se traduce como una sobreexplotación de los acuíferos, por lo que se debe recurrir a la captación de agua de lluvia ya que es una forma asequible de obtener agua para consumo humano y/o uso agrícola. En comunidades del mundo en donde no se dispone de agua en cantidad y calidad necesaria para consumo humano, se recurre al agua de lluvia como fuente de abastecimiento (OPS, 2004).

En efecto, la captación de agua de lluvia puede ser un método alternativo para suministrar agua a los hogares, en especial a comunidades marginadas y podría ser empleada para diversos fines. Se recomienda el uso de la técnica en zonas rurales o urbanas, las cuales deberán de cumplir con los milímetros mínimos (al menos 1000 mm de lluvia al año) requeridos de precipitación pluvial para que sea adecuado el abastecimiento de agua a los hogares que no cuenten con acceso a fuentes superficiales (Mwenge-Kahinda, *et al.*, 2007).

Para la sostenibilidad de la captación de agua de lluvia con fines domésticos se requiere cooperación conjunta entre el gobierno, el sector privado (ONG y la academia) y de los hogares donde se implementarán estos sistemas. Todos deben estar enfocados hacia la conformación de un sistema integrado donde la cantidad y calidad del agua suministrada sea lo primordial, así como los costos asociados a la implementación sean los menores posibles (Mwenge-Kahinda, *et al.*, 2007).

## 4.2 Balance hídrico en México.

El agua con la que se dispone en los países para el abastecimiento y para el desarrollo de actividades productivas es proveniente de la precipitación y en algunos casos se suma el agua proveniente de ríos que se internan en sus territorios (SEMARNAT, 2016).

Para el caso de México, recibe por precipitación un volumen anual promedio de 1449 km<sup>3</sup> de agua, donde el 71.5% regresa a la atmósfera por evapotranspiración. Al agua de lluvia se debe sumar aproximadamente 48 km<sup>3</sup> por agregación de los ríos de las fronteras norte y sur, restar un aproximado de 0.43 km<sup>3</sup> anualmente del Río Bravo en los Estados Unidos, de acuerdo con el tratado sobre Distribución de Aguas Internacionales. La disponibilidad natural media<sup>2</sup> en México es de 447.26 km<sup>3</sup> de agua en promedio al año (CONAGUA, 2014). Para realizar el balance hídrico se deben usar valores promedio para un periodo de tiempo específico, pero las variables que lo conforman cambian dependiendo de la época del año, tal como la precipitación, debido a la geografía nacional. A continuación, en la Figura 1 se presenta el balance hídrico en México.

---

<sup>2</sup> La SAMARNAT (2004) define a la disponibilidad natural media como el volumen total de agua renovable superficial y subterránea que ocurre en forma natural en una determinada región.

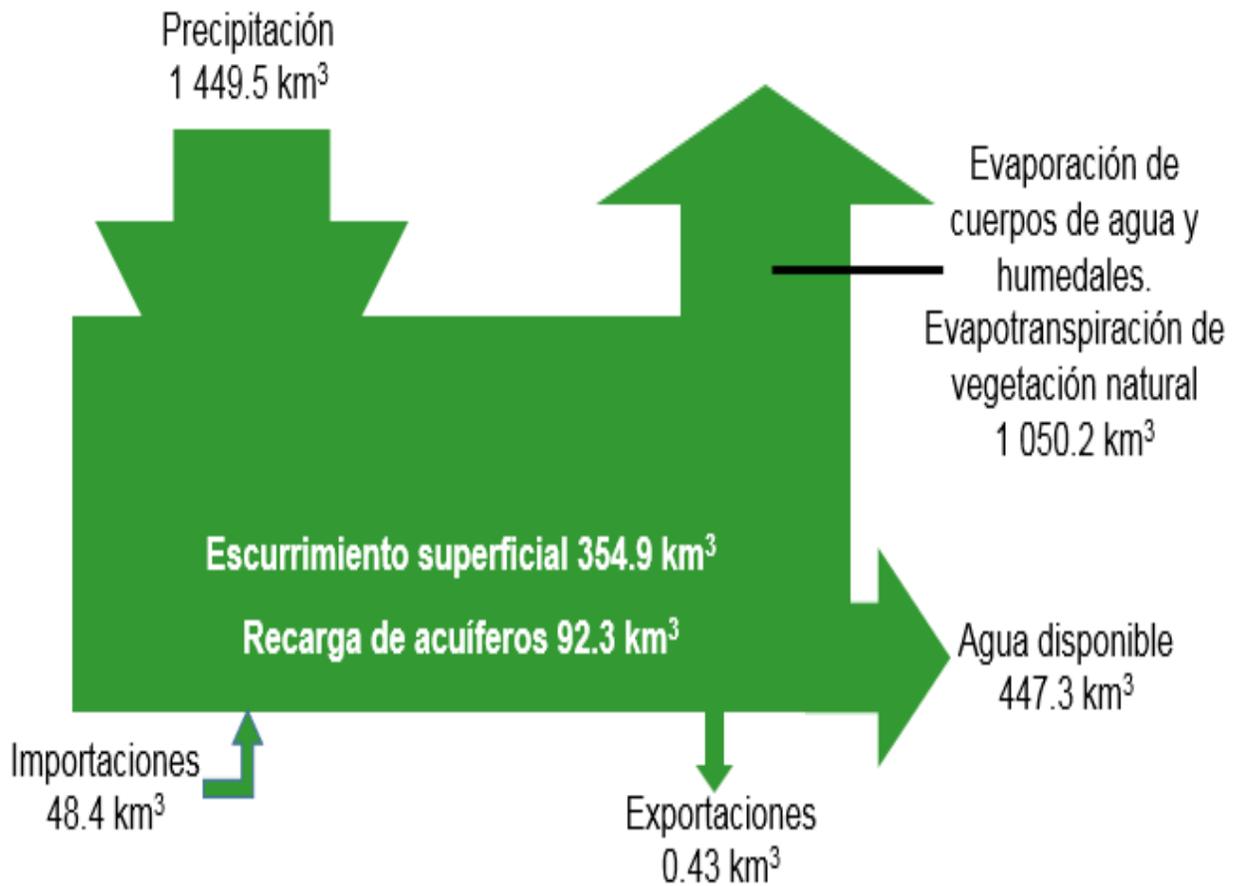


Figura 1. Balance hídrico para México. Fuente: SEMARNAT, 2016.

La sobreexplotación de los acuíferos ha ocasionado también el deterioro de la calidad del agua, sobre todo por intrusión salina y migración de agua fósil (la que, de manera natural, después de siglos, contiene sales y minerales nocivos para la salud humana) inducidas por los efectos del bombeo y por contaminación difusa producida en las ciudades y zonas agrícolas. Por otra parte, el monitoreo de la calidad de los acuíferos es escaso y poco confiable (FCEA, 2017), en la Figura 2 se presenta el balance hídrico para la Ciudad de México.

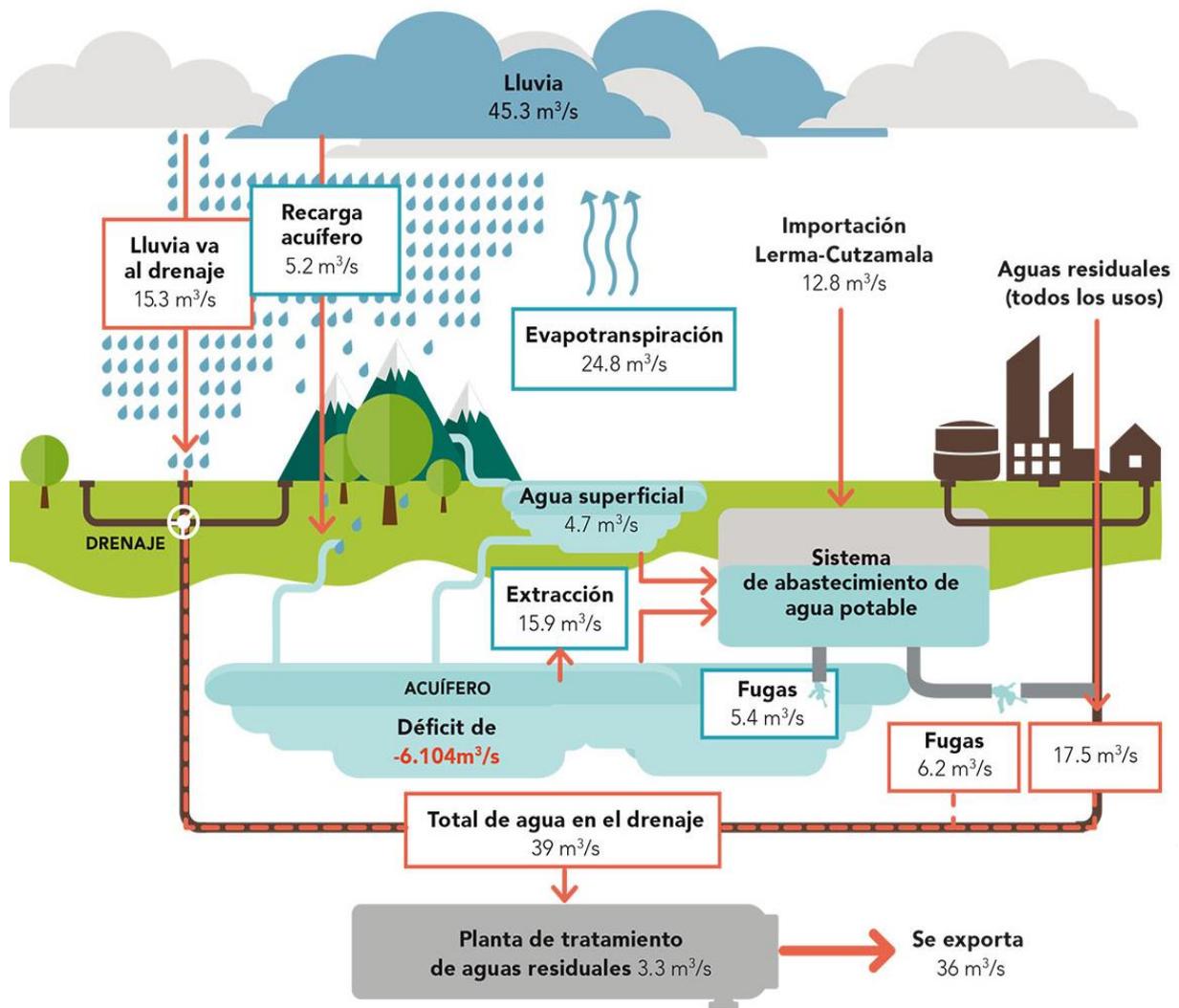


Figura 2. Balance hídrico para la Ciudad de México. Fuente: FCEA, 2017.

### 4.3 Plantas potabilizadoras instaladas y en operación en México

La CONAGUA (2017) reportó, que dentro de la infraestructura hidráulica con la que se cuenta en el país para suministrar el agua requerida a los diferentes usuarios y sectores nacionales, se dispone de:

- Más de 5,000 presas y bordos de almacenamiento.
- 6.5 millones de hectáreas con riego.
- 2.8 millones de hectáreas con temporal tecnificado.
- 908 plantas potabilizadoras en operación.
- 2,536 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación.

- 3,041 plantas de tratamiento de aguas residuales industriales en operación.
- Más de 3,000 km de acueductos.

El agua de fuentes subterráneas puede ser suministrada directamente a los usuarios para uso y consumo humano solo si entre otras características es, biológica, física y químicamente es apta para ese uso en particular. El agua proveniente de fuentes superficiales son naturalmente no potables y que por su composición deben ser sometidas a procesos de potabilización permiten asegurar la ausencia de contaminantes, y de esta manera evitar la proliferación de padecimientos intestinales (CONAGUA, 2015). En 2015 había en operación 874 plantas potabilizadoras, con una capacidad instalada de 2694 L/s o 140.7 m<sup>3</sup>/s que procesan y potabilizan un caudal de 97.8 m<sup>3</sup>/s. De los 348 m<sup>3</sup>/s de agua suministrada. A nivel nacional se estima que 60.5% provienen de fuentes subterráneas; el resto (137 m<sup>3</sup>/s), se obtiene de fuentes superficiales y se potabilizan 91 m<sup>3</sup>/s, 66% del agua superficial abastecida (CONAGUA, 2016).

La infraestructura para dar un tratamiento de potabilización no se encuentra distribuida de manera regular en el país. En 2015, destacaban en este rubro Jalisco y el Estado de México con caudales superiores a los 12,000 L/s (con 42 y 12 plantas, respectivamente). El proceso de potabilización más utilizado por el número de plantas se encuentra constituido por ósmosis inversa en 301 plantas (representan el 35% del total), seguido por el de clarificación convencional en 215 plantas (25%) y el de clarificación de patente en 154 plantas (17.95%), tratando 1,867 L/s, 69,597 L/s y 5,059 L/s, respectivamente. No obstante la CONAGUA continúa con su labor de brindar apoyo federal a través de las comisiones estatales del agua para que los sistemas de agua potable cumplan con las normas oficiales mexicanas NOM-127-SSA1-1994, NOM-179-SSA1-1998 y NOM-230-SSA1-2002, cuya finalidad es prevenir padecimientos de origen hídrico y proteger a la población contra riesgos sanitarios relacionados con el agua. En la Tabla 2 se presenta una breve descripción de los procesos de potabilización, el caudal potabilizado (en L/s) y el número total de plantas que cuentan con el proceso descrito en operación:

Tabla 2. Procesos empleados en las plantas potabilizadoras en México. Fuentes: CONAGUA (2006, 2017).

PROCESO DE POTABILIZACIÓN	DESCRIPCIÓN	CAUDAL POTABILIZADO, L/s Y (NO. DE PLANTAS)
Ablandamiento	Reduce o elimina la dureza del agua por presencia de iones calcio y magnesio de formaciones geológicas. Normalmente por precipitación química.	469 (18)
Adsorción	Remoción de iones y moléculas de una solución que presentan afinidad a un medio sólido adecuado.	64 (3)
Clarificación Convencional	Se emplea para aguas superficiales con alta turbiedad, color y/o microorganismos. Reduce la concentración de materia suspendida	69597 (215)
Clarificación de Patente	Puede ser convencional, filtración directa y filtros lentos, que se modifica en alguna de sus partes y se considera de fabricación exclusiva por un fabricante.	5059 (154)
Filtración Directa	Se emplea para aguas con niveles bajos de turbiedad, color y/o microorganismos. Elimina los sólidos presentes originalmente en el agua, o los precipitados.	16223 (101)
Filtración Lenta	Para aguas crudas con bajos contenidos de turbiedad y color, que no requiere tratamiento químico; generalmente para pequeños sistemas de abastecimiento.	56 (10)
Filtro de Carbón Activado	Gran capacidad de adsorción de diversos elementos, eliminación del cloro libre y compuestos orgánicos.	26 (35)
Ósmosis Inversa	Remoción de iones y moléculas disueltas en el agua, por medio de altas presiones que fuerzan su paso a través de una membrana semipermeable.	1867 (301)
Filtro de Carbón Activado	Gran capacidad de adsorción de diversos elementos, eliminación del cloro libre y compuestos orgánicos.	26 (35)

#### 4.4 Normatividad mexicana.

En México se cuenta con un marco jurídico para regular los estándares mínimos para la calidad de agua en lo que se refiere al agua de uso y consumo humano. La norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, “Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”, es la encargada de establecer los requerimientos que deben cumplir los sistemas de abastecimiento y las personas físicas y morales que la distribuyen en todo el país. Los estándares de agua potable en México constan de 48 parámetros con cuatro criterios: 1) Límites permisibles de características bacteriológicas, 2) Límites permisibles de características físicas y organolépticas, 3) Límites permisibles de características químicas, y 4) Límites permisibles de características radiactivas. Sin embargo, estos estándares consideran a fuentes superficiales y subterráneas como los recursos hídricos principales, por lo que contiene varios parámetros que no aplican al agua de lluvia, por ejemplo, radiactividad alfa global y radiactividad beta global (Lee, *et al.*, 2017).

A continuación, en la Tabla 3 y 3.1 se presentan los límites máximos permisibles de contaminantes biológicos, inorgánicos y orgánicos para éste estudio y su comparación con estándares internacionales.

**Tabla 3. Límites permisibles según la NOM-127-SSA1-1994 y su comparativa con otros criterios internacionales.**

CARACTERÍSTICA	NOM-127-SSA1-1994	OMS (2011)	EPA (2009)
<b>Bacteriológicas</b>			
Organismos coliformes totales	Ausencia o no detectables.	0 UFC/100 mL	0 UFC/100 mL
<i>E. Coli</i> , organismos fecales u organismos termotolerantes	Ausencia o no detectables.	0 UFC/100 mL	0 UFC/100 mL

**Tabla 3.1 Continuación de Límites permisibles según la NOM-127-SSA1-1994 y su comparativa con otros criterios internacionales.**

CARACTERÍSTICA	NOM-127-SSA1-1994	OMS (2011)	EPA (2009)
<b>Físicas</b>			
Color	20 unidades de color verdadero en la escala Platino-Cobalto.	No hay directriz <sup>3</sup>	15 unidades de color verdadero en la escala Pt/Co
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.	1.5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.	No hay directriz <sup>4</sup>
<b>Químicas</b>			
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500 mg/L	No hay directriz <sup>5</sup>	No hay directriz
pH (potencial hidrógeno) en unidades de pH	6.5-8.5 unidades de pH	8.2-8.8 unidades de pH	6.5-8.5 unidades de pH
Sólidos Disueltos Totales	1000 mg/L	No hay directriz	500 mg/L

Conviene señalar que la NOM-127-SSA1-1994 hace énfasis en que el abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es vital para prevenir y evitar enfermedades gastrointestinales, para lo cual se requiere límites permisibles para características microbiológicas, físicas, organolépticas y químicas, con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega al consumidor.

El agua de lluvia tiene un pH cercano al neutro, no posee dureza y no contiene subproductos de desinfección o contaminantes generados por el hombre (TWDB, 2005). En el presente estudio, por la ubicación donde se localiza el área de captación y muestreo están a salvo de cloro, materiales radiactivos, plaguicidas y

<sup>3</sup> Deseable: 15 unidades de color verdadero en la escala Platino-Cobalto.

<sup>4</sup> Para sistemas que usan filtración convencional, en ningún momento la turbiedad del agua puede superar a 1 UTN, y las muestras deben ser menores o iguales a 0.3 UTN en al menos 95% de las muestras en cualquier mes.

<sup>5</sup> Deseable: 150-1500 mg CaCO<sub>3</sub>/L

productos químicos orgánicos, por lo tanto, los parámetros relacionados fueron excluidos del análisis de la calidad del agua de lluvia.

Aunado a lo anterior, se sabe que las concentraciones traza de metales surgen de la deposición de partículas sólidas de fuentes de contaminación antropogénicas (liberación de gases por parte de la industria, uso de combustibles fósiles, por mencionar algunos) en la atmósfera en temporada de estiaje. Por ello, la calidad del agua de lluvia está influenciada por varios factores físicos, tales como los orígenes de las masas de aire, las fuentes de contaminación, medios de transporte y por las partículas de aerosoles (Miao-Ching & Chen-Feng, 2010). De hecho, se ha cuestionado la práctica de captar el agua de lluvia en la Ciudad de México y en su Zona Metropolitana, ya que su característica principal es tener la mayor concentración de contaminantes atmosféricos del país. En investigaciones como las de García (2013) y Hernández (2016) reportan que algunos metales pesados como aluminio, cadmio, cromo, hierro, manganeso y plomo no exceden la norma actual en México para el uso potable del agua y por tal motivo el presente trabajo consideró no cuantificar metales pesados, aunque también influyó el tema de costo para su determinación.

Se debe tener especial atención en la influencia de factores climáticos por que los microorganismos transportados por el aire contribuyen significativamente a la carga bacteriana del techo y, por lo tanto, al agua captada y almacenada (Evans, *et al.*, 2006). Con la ayuda de indicadores tradicionales como los coliformes totales y coliformes fecales que generalmente son utilizados para evaluar la calidad microbiológica del agua de lluvia es posible conocer si se encuentra contaminada. Es importante el conocimiento de que por sí mismos todos los coliformes no constituyen una amenaza para la salud; su determinación se usa para indicar si pudiera haber presentes otras bacterias posiblemente nocivas<sup>6</sup> pertenecientes a dicho grupo (Dozier & McFarland, 2009), tales como *Escherichia coli*, entre otras (Meera & Mansoor-Ahmed, 2006).

---

<sup>6</sup> Las coliformes fecales son bacterias cuya presencia indica que el agua puede estar contaminada con heces fecales humanas o animales. Los microorganismos (patógenos) en estas heces pueden causar diarrea, calambres, náuseas, dolores de cabeza u otros síntomas.

La norma oficial mexicana relativa al agua potable no establece distinción alguna en relación al grado de importancia de los diferentes parámetros considerados. Por otro lado, se incluyen límites a sustancias que no son consideradas en la normatividad de la OMS o de la EPA, tal es el caso del sodio, para el cual la OMS (2011) señala que su umbral gustativo se relaciona con el anión asociado y de la temperatura de la solución.

Se requiere de una regulación actualizada y que se efectúe de forma periódica, con el fin de actualizar los parámetros de calidad del agua relacionados con posibles efectos en la salud que no se encuentren contemplados en la versión vigente (ácido haloacético, bromato, compuestos orgánicos, *Cryptosporidium* sp., selenio y residuos de aditivos del tratamiento del agua, etc. (Espino-Valdés, *et al.*, 2016).

La normatividad mexicana contempla aspectos basados preferentemente en los ordenamientos de la OMS, como se observa en la Tabla 4, y aunque muchos de los parámetros limitados en la norma mexicana como LMP (Límite Máximo Permissible) guardan estricta similitud con los lineamientos de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (US EPA). A consecuencia de ello, se recomienda actualizar los listados de parámetros de calidad del agua relacionados con posibles efectos en la salud, eliminar los parámetros sin relevancia o valor referencia por no ser importantes para la salud (por ejemplo sodio), incluir parámetros importantes para la salud y no contemplados en la versión vigente (virus entéricos, *Cryptosporidium* sp., *Giardia lamblia*, cuenta heterotrófica), así como compuestos orgánicos que incluyen residuos de aditivos de tratamiento del agua (acrilamida), herbicidas (alaclor, atrazina, 2,4-D), residuos agrícolas (carbofurano, clordano, DBCP, toxafeno), residuos de la industria química y farmacéutica.

Para el caso del agua de lluvia, la mayoría de los parámetros cumplen con los límites máximos permitidos en diversas normatividades del mundo lo que ocasiona que se pueda consumir como agua potable con un tratamiento simple, de tal manera probar todos los estándares de agua potable en el agua de lluvia es ineficaz e ineficiente ya sea por su alto costo en su determinación o por falta de recursos humanos capaces de desarrollar técnicas analíticas.

## 4.5 Calidad del agua

La importancia de asegurar acceso de la comunidad a agua potable de calidad controlada es una prioridad para diversas entidades como la UNICEF (*United Nations International Children's Emergency Fund*) o la Organización Mundial de la Salud (OMS), entre otras. En algunos de sus reportes aportan información acerca de estándares mínimos para asegurar la calidad del agua (Bueta & Martínez, 2014).

Las técnicas de medición de la calidad del agua se emplean para:

- Medición de contaminantes para evaluación de sus efectos.
- Medición de grupos o familias de compuestos con comportamiento similar.
- Identificación de un compuesto en particular.

Las técnicas pueden ser:

- Colorimétricos (fosfatos, metales pesados, nitratos, sulfatos).
- Cromatográficas.
- Electroquímicas.
- Espectrométricas.
- Gravimétricos (sólidos suspendidos totales, sólidos totales, etcétera).
- Volumétricas (alcalinidad total, dureza total, dureza al calcio, cloruros).

El proyecto de norma oficial mexicana PROY NOM-250-SSA1-2014, “Agua para uso y consumo humano. Límites máximos permisibles de la calidad del agua y requisitos sanitarios que deben cumplir los sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados, su control y vigilancia. Procedimiento sanitario de muestreo” establece las especificaciones mínimas de los métodos de análisis y hace hincapié en que la vigilancia de la calidad del agua para uso y consumo humano. La anterior tiene como objetivo prevenir la transmisión de enfermedades infecciosas y parasitarias, así como las derivadas de la continua ingestión de sustancias tóxicas que puede contener el agua abastecida a la población. A continuación en la Tabla 4, se muestra un resumen de los métodos establecidos en el proyecto de norma.

Tabla 4. Especificaciones mínimas de los métodos de análisis según el PROY-NOM-SSA1-250-2007.

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO
<b>Parámetros físicos y organolépticos</b>		
Color verdadero	U Pt/Co	Colorimetría
Conductividad eléctrica	μs/cm	Conductimetría
Olor	No. Umbral	Panel sensorial
pH	Unidades de pH	Potenciometría
Sabor	No. Umbral	Panel sensorial
Turbiedad	UTN	Tubidimetría
<b>Parámetros inorgánicos</b>		
Cianuros totales	mg/L	Espectrofotometría UV/Visible
Dureza Total	mg/L	Volumetría
Fluoruros	mg/L	Espectrofotometría UV/Visible, Cromatografía de iones, ión selectivo
Nitrógeno de Nitratos	mg/L	Espectrofotometría UV/Visible, Cromatografía de iones
Nitrógeno de Nitritos	mg/L	Espectrofotometría UV/Visible, Cromatografía de iones
<b>Microorganismos</b>		
Coliformes fecales	NMP/100 mL	Número más probable
Coliformes fecales	UFC/100 mL	Filtración por membrana
<i>E. Coli</i>	NMP/100 mL	Número más probable
<i>E. Coli</i>	UFC/100 mL	Filtración por membrana
<i>E. Coli</i>	Presencia/Ausencia/mL	Sustrato cromogénico (MUG)
Colifagos	Fagos/L	Siembra en placa
<i>Entamoeba histolytica</i>	quistes/L	Microscopía fluorescencia
<i>Giardia lamblia</i>	quistes/L	Microscopía fluorescencia

La calidad del agua potable es de vital importancia para el gobierno federal debido a su crucial papel en el bienestar y para el cuidado de la salud. De manera estricta, se denomina agua potable a aquella que cumple con los 48 parámetros establecidos por la NOM-127-SSA1-1994, por lo tanto no debe contener *E. coli* en ninguna muestra de 100 mL y los organismos coliformes totales deben ser ausentes o no detectables en ninguna muestra de 100 mL (Jiménez, *et al.*, 2010). La OMS (2017), la define como aquella agua que no representa riesgo para la salud durante el periodo de consumo. Las personas que se encuentran en mayor riesgo de padecer enfermedades transmitidas por el agua es la población sensible (menores a 12 años, personas inmunocomprometidas o con algún padecimiento adicional y de la tercera edad), especialmente cuando se vive en condiciones insalubres.

La deficiente calidad del agua que será destinada a un uso en particular puede ser ocasionada a diversas causas tanto naturales como artificiales, cuando es ocasionada y/o afectada por las actividades del hombre, tiene lugar el fenómeno determinado como contaminación (Durand-Alegría, *et al.*, 2005).

Las actividades industriales han incrementado la concentración de contaminantes en el agua de la superficie terrestre y en depósitos de agua subterránea, además de nutrientes (amonio, fosfatos y nitratos principalmente), el agua puede contaminarse con compuestos químicos que afectan la vida silvestre e imposibilita su uso para consumo humano (Barba, 2002).

Debido a que la captación del agua de lluvia es una alternativa para el abastecimiento de agua en zonas altas y marginadas que tienen problemas constantes con el servicio (Suaste & Morelos, 2018). La calidad del agua depende directamente de la condición de la atmósfera, debido a que pudieran estar presentes partículas, microorganismos, metales pesados y sustancias orgánicas, que se eliminan de la atmósfera durante los eventos de lluvia (Helmreich & Horn, 2009).

Para determinar la calidad del agua es necesario conocer distintos parámetros biológicos, físicos y químicos de determinadas muestras, para así garantizar que el agua es apta para consumo humano. A continuación, se da la definición a los parámetros de calidad de interés en este trabajo:

#### **4.5.1 Parámetros biológicos**

En términos generales, los riesgos microbianos están asociados con la ingestión de agua que está contaminada con heces de animales. Las heces pueden ser una fuente de virus, bacterias patógenas, protozoarios y helmintos (WHO, 2008).

La NMX-AA-102-SCFI-2006 define a los organismos coliformes fecales como todos los bacilos aerobios o anaerobios facultativos, Gram negativos, no esporulados que fermentan la lactosa con producción de ácido y gas a 44°C en un plazo de 24 horas.

Los organismos coliformes totales son los bacilos aerobios o anaerobios facultativos, Gram negativos, no esporulados que fermentan la lactosa entre 35°C

a 37°C con producción de gas y ácido en un periodo comprendido de 24 horas a 48 horas (Ramos, *et al.*, 2003).

El agua de lluvia es relativamente segura para uso doméstico, teniendo por inconveniente que surgen problemas relacionados por contaminación externa en los techos originados por el asentamiento de contaminantes atmosféricos y por heces de animales. Por ello se deben seguir procedimientos para una correcta captación del agua y se debe estar consciente de los riesgos a la salud de los contaminantes microbiológicos, mineral, orgánicos y de esta manera implementar medidas apropiadas para evitar almacenar agua contaminada (Campisano, *et al.*, 2017).

#### **4.5.2 Parámetros físicos**

Es de vital importancia para este trabajo saber que la calidad del agua de lluvia captada depende en gran medida de los materiales empleados en la fabricación y construcción del SCALL, así como de las condiciones atmosféricas del sitio donde se instaló (Melidis, *et al.*, 2006).

En la presente investigación se determinaron parámetros físicos tales como conductividad eléctrica, color, sólidos disueltos y turbiedad.

La conductividad eléctrica es la cuantificación numérica de la habilidad de una disolución acuosa para conducir una corriente eléctrica y depende del tamaño, número y carga de iones. Se emplea para establecer el grado de mineralización en el agua (Ramos, *et al.*, 2003).

El término color se emplea y relaciona usualmente con la composición y concentración para describir un agua. El agua presenta coloración debida a la descomposición de sustancias naturales y contaminantes químicos industriales. Si la presencia de color se debe a materia suspendida se denomina color aparente, cuando es eliminado ese color, al restante se le denomina como color verdadero (Ramos, *et al.*, 2003).

Los sólidos disueltos o filtrables son aquellos que pasan a través de un filtro de tamaño de poro de 1.2 µm; comprenden partículas como iones y coloides.

Los sólidos suspendidos es la fracción de material disuelto en el agua y comprenden a los sedimentables, flotantes, no sedimentables (coloides), sustancias orgánicas (sólidos suspendidos volátiles) o inertes (no volátiles o fijos). Esta fracción es la responsable de generar turbiedad en el agua (Ramos, *et al.*, 2003).

Los sólidos totales desde el punto de vista analítico son toda la materia remanente en el agua después de haber sido evaporada en un rango de temperaturas de 103°C y 105°C (Ramos, *et al.*, 2003).

La turbiedad es la medida de la capacidad de un agua para dispersar y absorber la luz en línea recta a través de una muestra indica la presencia de material disperso (orgánico e inorgánico), emulsificado, suspendido y microorganismos. Es de relevancia para la eficacia de la desinfección, filtrabilidad de contaminantes y antiestetividad del agua (Ramos, *et al.*, 2003).

#### **4.5.3 Parámetros químicos**

La alcalinidad en agua es debida a la presencia de bicarbonatos, carbonatos, cloruros, hidróxidos, silicatos y sulfatos de elementos como calcio, magnesio, sodio y potasio.

El carbono orgánico total (COT) es una prueba que no determina que compuestos en concreto se encuentran presentes en el agua. En lugar de ello, el ensayo sólo informa al usuario la presencia de la suma de todo el carbono orgánico presente en estos compuestos (HACH, 2015). Es importante su cuantificación porque la materia orgánica presente en el agua compite con los compuestos químicos empleados para la desinfección (como el cloro), generando subproductos de la desinfección que pudieran ser cancerígenos como los trihalometanos (Font-Ribera, *et al.*, 2010).

La NMX-AA-030/1-SCFI-2012 establece que la demanda química de oxígeno (DQO) medida a través del método de dicromato, puede ser considerada como una medida aproximada de la demanda teórica de oxígeno o de la cantidad de oxígeno consumida en la oxidación química total de constituyentes orgánicos a productos inorgánicos finales.

La dureza se entiende como la capacidad de un agua para precipitar al jabón. Está basado en la presencia de sales de los iones calcio y magnesio.

El potencial hidrógeno (pH) es definido como el logaritmo negativo del ión hidrógeno activo, la actividad es considerada igual a la concentración, por lo que el número de protones (iones  $H^+$ ) y el número de iones hidroxilo ( $OH^-$ ). En el campo de abastecimiento de agua potable, si la concentración del ión hidrógeno no es adecuada imposibilitara tratamientos como la desinfección, ablandamiento<sup>7</sup>, control de corrosión, etcétera.

#### 4.6 Oportunidades en la captación de agua de lluvia.

Los gobiernos alrededor del mundo enfrentan el desafío de alimentar a un gran número de personas, la mayor parte de ellas viven en zonas rurales y su sustento económico se basa en la agricultura de tierras secas. En dicha situación, surge una creciente conciencia sobre las inadecuadas prácticas de riego convencionales para la subsistencia de tierras secas con recursos hídricos y económicos limitados para los agricultores. El potencial para mejorar la productividad y los ingresos familiares de los campesinos se encuentran en el desarrollo e implementación de las tecnologías como lo es la captación de agua de lluvia (Mwenge-Kahinda, *et al.*, 2007).

En zonas rurales y urbanas la captación de agua de lluvia se lleva a cabo en techos y otras superficies impermeables para su recolección, almacenamiento y tratamiento para su posterior reúso. Los usos del agua captada son diversos (por ejemplo, descargas de inodoros, lavado de automóviles, limpieza de patios o riego de áreas verdes), pero todos apuntan a reducir el consumo de agua potable (Campisano, *et al.*, 2017).

Por otro lado, en la mayoría de los países con economías emergentes el crecimiento poblacional es desmedido, tanto que el suministro de agua potable no puede

---

<sup>7</sup> LENNTECH (2017) define el ablandamiento de agua como el conjunto de técnicas para la eliminación de los iones calcio y magnesio que hacen ser a un agua dura.

satisfacer la demanda, siendo la captación de agua de lluvia excelente fuente alternativa para el abastecimiento de agua potable, ya que se puede suministrar agua de buena calidad y cantidad. De hecho, podría sustituir al agua potable en distintos usos, como en la limpieza de calles, llenado de piscinas, riego de parques e incluso para usos en los que se requiera agua potable mediante tratamientos de potabilización (Méndez, 2016).

Los sistemas para captación de agua pluvial con una buena administración y mantenimiento (techo limpio y tanque de almacenamiento adecuado) podría proporcionar agua potable con buena calidad, comparada con aguas superficiales y subterráneas (Lee, *et al.*, 2017). Ella siendo una fuente de abastecimiento alterna que posee diversos beneficios para la población, en especial para las zonas rurales (Fuentes, *et al.*, 2018) y que con una correcta gestión podría disminuir la crisis del agua y de alimentos en algunas de estas regiones (Helmreich & Horn, 2009).

Es importante mencionar que bacterias coliformes han sido detectadas en agua de lluvia no tratada y que después de ser sometida a un tratamiento de potabilización no mostró rastros de microorganismos (Ríos-Tobón, *et al.*, 2017), sin embargo, no es posible establecer una relación entre la presencia de microorganismos en el agua de lluvia y los padecimientos que generan. No obstante, se puede sugerir, que para evitar el crecimiento de microorganismos se debe hacer uso de un *biofilm* limpio en el tanque de almacenamiento y equipos para la desinfección del agua (Lee, *et al.*, 2017). La calidad de agua de lluvia no se ha estudiado a fondo y se desconoce en varias localidades urbanas su condición física, microbiológica y química que dependen de diversos componentes presentes en el aire por actividades antrópicas y de condiciones naturales. Su evaluación permite definir en cierta medida la calidad del aire y los potenciales contaminantes que pueden hacerse presentes en mayor o menor concentración (Ospina-Zuñiga & Ramírez-Arcila, 2014).

#### **4.7 Antecedentes históricos de la captación de agua de lluvia en México**

El agua es un recurso indispensable, ya que sin ella no sería posible la vida en el planeta y de gran importancia en las sociedades del mundo, al ser indispensable tanto para uso doméstico como industrial.

Se sabe que la captación del agua de lluvia se ha desarrollado desde hace más de cinco mil años, en Mesoamérica fue una práctica común, pese a que el ser humano siempre ha utilizado el agua superficial como la primera fuente de abastecimiento de las comunidades para diversos usos. Con el crecimiento demográfico de los asentamientos humanos fue necesario ocupar zonas áridas y semiáridas del planeta; así es como fue el inicio del desarrollo de las formas de captación de agua de lluvia como una alternativa para el riego de los cultivos y para el uso doméstico (Anaya-Garduño, 2009).

Debido a la geografía del Valle de México, se cuenta con lluvias irregulares y atemporales. No obstante, el sistema lacustre obligó a generar soluciones que propiciaron la aparición de sistemas de captación de agua de lluvia para el desarrollo de la agricultura de riego, aprovechándolas mediante sistemas naturales (arroyos, manantiales y ríos) o artificiales que la captaban, desviándola a los campos de cultivo. El agua que caía era recolectada mediante canales y zanjas, la cual era conducida desde los techos de las viviendas y edificios por medio de canjilones de madera o pencas, almacenándola en depósitos subterráneos, externos, o bien a cielo abierto (Impluvium, 2014).

Se han encontrado vestigios de almacenes subterráneos domésticos en el área de San José Mogote (1000 a.C.), Tierras Largas (1000-900 a.C.) y en Oaxaca. En la Figura 3 se observan depósitos subterráneos conocidos como *chultunes*<sup>8</sup> o cisternas mayas que se han localizado y que eran ampliamente utilizados en la península de Yucatán, fueron vitales para los asentamientos prehispánicos.

---

<sup>8</sup> *Chultún*: sistema de captación y almacenamiento pluvial, compuesto de una cámara subterránea en forma de botella. Construida por los mayas.



Figura 3. Área de recolección de agua de un chultún o cisterna maya. Fuente: CONAGUA, 2009.

La CONAGUA (2009) reportó que los depósitos pluviales a cielo abierto más comunes en la antigüedad eran los *jagüeyes*<sup>9</sup>, que eran ampliamente utilizados en el centro y el sur de México, en especial en zonas áridas y semiáridas donde el nivel freático es muy bajo o el suelo rocoso y resultaba difícil alcanzarlo mediante la excavación de pozos someros.

Los *jagüeyes* canalizaban el agua de las pequeñas corrientes pluviales o de los escurrimientos de los cerros y techos aledaños. El agua de lluvia captada era almacenada para uso posterior, el desarrollo e implementación de estas técnicas ayudaron durante la temporada de estiaje, mientras que en la de lluvias contribuyeron a evitar inundaciones (Impluvium, 2014).

#### 4.8 Situación actual de la captación de agua de lluvia en México

En el año 2016 la CONAGUA estimó que en México, 35,779 localidades en las cuales llueve más de 1,500 mm al año, existe la posibilidad de proponer sistemas de captación de agua de lluvia para abastecer los 50 L/d requeridos, ya sea como abasto primario o complementario. Lo anterior no significa no se pueda hacer captación de lluvia en otros sitios, por lo que se destina recursos federales del Programa Nacional para Captación de Agua de Lluvia y Ecotecnias en Zonas

---

<sup>9</sup> *Jagüey*: depósito superficial de agua en zonas con sequías estacionales prolongadas.

Rurales (PROCAPTAR) a las localidades que cumplan con los criterios y de ésta manera desarrollar e implementar el aprovechamiento del agua de lluvia.

Además del programa anterior, existen otros como lo es el del sistema de aguas de la Ciudad de México (SACMEX) que propone en su Programa Especial de Agua; Visión 20 años, implementar proyectos para aprovechar el agua de lluvia para la recarga natural e inducida de la Ciudad de México, hasta por 3.5 m<sup>3</sup>/s. Dicho plan se logrará mediante proyectos de reforestación, preservación y recuperación de áreas naturales, además de la construcción de infraestructura para captación e infiltración. Con el fin de reducir la sobreexplotación del acuífero y sus efectos colaterales deben sumarse las posibles modificaciones del ciclo hidrológico y otras condiciones asociadas al cambio climático (SACMEX, 2012).

En días actuales se han buscado múltiples usos para el agua de lluvia, el más investigado y desarrollado por los beneficios que trae consigo es el abastecimiento de agua potable debido a que se ha detectado como una alternativa sustentable y viable a largo plazo, además de cuidadosa con el ambiente. Se estima que cada familia en la Ciudad de México podrá captar 52,000 litros de lluvia al año aproximadamente, considerando un techo promedio de 60 m<sup>2</sup>.

El agua se podrá utilizar para las necesidades del hogar, e inclusive beber (con un correcto tratamiento destinado para este fin) y se podrá abastecer a las casas con agua de manera gratuita en un periodo cinco a ocho meses al año (Isla Urbana, 2015).

El abastecimiento de agua potable por medio de sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL) representaría varias ventajas para el usuario si se efectúa el adecuado mantenimiento de dicho sistema, tales como la reducción en la factura a pagar por el servicio de agua potable suministrada por parte del municipio, entre otras (CONAGUA, 2016).

El uso planificado de la lluvia debería garantizar la soberanía alimentaria, la recarga de acuíferos, facilitar la reducción de desastres y la supervivencia de ecosistemas estratégicos (Pacheco, 2008). Los usos del agua de lluvia en la actualidad son: domésticos, productivos, sanitarios, para higiene, protección de cuencas, soberanía

alimentaria, conservación de suelos, recarga de acuíferos, preservación de ecosistemas estratégicos, prevención de desastres, para estrategias de reconstrucción después de los desastres, usos simbólicos, lúdicos y sagrados.

En México se ha probado que coleccionar el agua lluvia fomenta la conservación de energía al evitar su uso en la operación de sistemas de bombeo y de transporte de agua. Al ser captada y almacenada se reduce la erosión y se previenen las inundaciones provocadas por el exceso de escorrentía (Gleason, 2005).

#### **4.9 Efecto de los materiales de techado en la calidad del agua de lluvia captada**

El dominio de los factores determinantes de la calidad del agua captada y los riesgos asociados a la salud pública para su consumo humano es fundamental para el diseño, operación y evaluación de los sistemas de captación para el suministro de agua potable en los países en desarrollo (Gwenzi, *et al.*, 2015).

Existen fuentes representativas de contaminación difusa<sup>10</sup> para el agua de lluvia, estas pueden ser externas que son los contaminantes transportados por el aire (hojas, desechos orgánicos de aves, canidos, felinos, roedores, etcétera y sustancias orgánicas generadas por las actividades humanas), donde se contienen organismos potencialmente patógenos que pudiesen tener acceso al área de captación. En el agua captada de urbes se reporta la presencia de diversos tipos de contaminantes como herbicidas, hidrocarburos aromáticos policíclicos, metales pesados y múltiples tipos de microorganismos, siendo los más comunes las bacterias indicadoras de contaminación fecal, bacterias patógenas y protozoarios (Mendez, *et al.*, 2011). Debido a lo anterior el agua de lluvia puede representar un riesgo para la salud pública si no se cuenta con un manejo integral del recurso y así como con un sistema de potabilización previo a su uso (Young, *et al.*, 2012). Las fuentes internas se originan en los materiales de techado por sí mismos (Young, *et al.*, 2012). El tipo de material de techado empleado para la captación puede afectar la calidad del agua. Se ha confirmado el importante papel

---

<sup>10</sup> AGUA.COM.MX (2017) define que la contaminación difusa es ocasionada por fuentes sin un punto de origen específico.

que desempeñan éstos materiales debido a las concentraciones de metales liberadas y la aportación de nutrientes al agua (Nicholson, *et al.*, 2009).

Estudios efectuados por Farreny, *et al.*, 2011; Mendez, *et al.*, 2011; Young, *et al.*, 2012; Gwenzi, *et al.*, 2015 revelan que el escurrimiento directo del agua en los materiales de techado agrega contaminación al caludal, por ejemplo, en las láminas galvanizadas se reportan altas concentraciones de aluminio, hierro, zinc, que se relacionan significativamente con los iones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y potasio ( $\text{K}^+$ ). Además, estos mismos autores establecen que los techos de tejas de asfalto pueden constituir una fuente de partículas de plomo y potencialmente de mercurio. Las maderas tratadas generan concentraciones de cobre demasiado altas. En paralelo, se descubrió que el concreto y el asbesto se encuentran íntimamente relacionados con los iones calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) y estos favorecen la colonización por varias especies de plantas que generan ablandamiento del techo.

Sin embargo, no se puede establecer correlaciones entre las concentraciones de contaminantes y los materiales empleados en los techos para la captación de agua de lluvia.

#### **4.10 Barreras<sup>11</sup> para el proceso de potabilización del agua de lluvia captada.**

Es necesario que el agua destinada para consumo directo de las personas sea tratada antes de su ingesta, por ello, el tratamiento debe estar dirigido a la remoción de las partículas que no fueron retenidas por el dispositivo de captación del agua de lluvia, y en segundo lugar al acondicionamiento bacteriológico.

Gwenzi, *et al.*,(2015) demostraron que si el agua de lluvia captada en los techos no es sometida a un proceso de potabilización antes de su consumo representa riesgos a la salud debido a la presencia *Salmonella* spp., *Giardia lamblia*, *Legionella pneumophila* y *Campylobacter jejuni*, por mencionar algunos.

---

<sup>11</sup> Diferentes etapas del proceso de potabilización.

El tratamiento puede efectuarse por medio de filtros caseros seguida de la desinfección (OPS, 2004). Para el sistema de potabilización se consideraron varios tratamientos que se enlistan y explican a continuación:

#### ***4.10.1 Filtro de arena.***

Son los medios filtrantes más utilizados para dar tratamiento al agua con concentraciones bajas de contaminantes (CONAGUA, 2015). En éste, las partículas en suspensión del agua son retenidas a su paso a través del lecho filtrante compuesto de arena y grava, se cuenta con distintos tamaños de granulometría (0.20 mm a 0.30 mm).

La calidad de la filtración depende de varios parámetros, como lo son, la geometría del filtro, características y granulometría del lecho filtrante, velocidad de filtración, así como la calidad inicial del agua.

Una vez que el filtro se haya saturado de impurezas, perdiendo su capacidad de remoción de contaminantes, para ser regenerado debe ser lavado a contra corriente con agua potable.

#### ***4.10.2 Filtro de carbón activado.***

La función principal de estos filtros es la eliminación de cloro y compuestos orgánicos en el agua. El funcionamiento es el mismo que en los filtros de arena, realizándose la retención de contaminantes al pasar el agua por un lecho filtrante compuesto de carbón activo con distintos tamaños de granulometría (0.59 mm a 0.88 mm). Es un método eficiente para eliminar cloro, olor, sabor y sólidos suspendidos en el agua. También retiene algunos contaminantes orgánicos, como herbicidas (Mendoza, 2004).

#### ***4.10.3 Filtro de carbón activado impregnado en plata coloidal.***

Es un medio filtrante de origen mineral impregnado con plata coloidal con tamaño de granulometría de 0.063 mm, permitiéndole retener más del 98.6% de las bacterias y más del 95% de contaminantes químicos como cloro, detergentes, plaguicidas y plomo (Carbotecnia, 2014). Tiene como objetivo la obtención de agua

limpia, libre de sedimentos, bacterias y sustancias químicas eliminando sabor, olor o color que pudiera tener el agua, antes de ser filtrada (Aguamarket, 2017).

#### **4.10.4 Filtro KDF**

El filtro *Kinetic Degradation Fluxion* (KDF) es un medio filtrante con gránulos de gran pureza y con distinto tamaño de granulometría fina (0.149 mm a 2 mm) de cobre-zinc. Generalmente son usados en pretratamiento, tratamiento primario y de agua residual para mantener el sistema y alargar la vida útil del tren de tratamiento. Reduce o elimina contaminantes del agua tales como bacterias, algas, hongos, calcio, carbonatos, cloro, cromo, hierro, magnesio, mercurio, plomo y sulfuro de hidrógeno empleando reacciones oxidación/reducción (LENTECH, 2017).

#### **4.10.5 Radiación ultravioleta (UV<sub>254</sub>)**

La radiación ultravioleta, conforma una de las franjas del espectro electromagnético que posee mayor energía que la luz visible. La irradiación con rayos UV a los gérmenes presentes en el agua provoca daño en su molécula de ADN, que impiden la división celular y causan su muerte. La radiación más germicida es aquella con una longitud de onda de 254 nm.

El material genético expuesto a esta energía presenta un máximo de absorción, produciéndose una inactivación irreversible en el crecimiento de los organismos expuestos (Confidence, 2018). La radiación ultravioleta es un procedimiento físico que no altera la composición química, el sabor o el olor del agua. Éste constituye una alternativa segura, eficaz, económica y ecológica frente a otros métodos de desinfección del agua, en comparación con la cloración por la posible formación de subproductos de desinfección como lo es el ácido acético halogénico (HAA) o los trihalometanos (THM), cuyos efectos son aún evaluados. Este método es automático, efectivo, no daña el ambiente y fácil de instalar.

La Tabla 5 es un resumen que muestra la función de los filtros que constituyen el sistema de potabilización planteado de acuerdo con los elementos y medios filtrantes que los componen; así es posible determinar si se trata de un filtro purificador de agua “bactericida” (destruye a las bacterias), de uno “bacteriostático”

(inhibe el desarrollo de las bacterias), o simplemente un filtro para mejorar el sabor del agua después de remover los sedimentos, el cloro y otros contaminantes.

Tabla 5. Función de los filtros de acuerdo con su medio filtrante. Fuente: Adaptada de Romero, 2017.

BARRERA	BACTERIA COLIFORME	VIRUS	GIARDIA CYSTICERCOS	AMIBAS	SHIELLA SALMONELLA	SABOR, OLOR, COLOR	THIHALOMETA NOS	COMPUESTOS VOC´C/TOC´S	HALOGENOS	PLAGUICIDAS FENOLES	PLOMO, CADMIO	CALCIO, MAGNESIO	YODO	CLORO
Filtro de carbón activado						◆	◆	◆	◆	◆			◆	◆
Filtro de carbón con plata coloidal	●	●	●	●	●	◆	◆	◆	◆	◆				◆
Filtro KDF	●		●	●	●		◆	◆	◆	◆	◆	◆		◆
Lámpara UV	▲	▲	▲	▲	▲									
Inhibe ●			Retiene ◆			Destruye ▲								

VOC´s = Compuesto Orgánicos Volátiles; TOC´s = Carbón Orgánico Total

De igual manera dentro de la misma Tabla 5, los filtros de carbón activado son los más eficaces en la eliminación de cloro, sólidos suspendidos, compuestos orgánicos volátiles (VOC´s), el sabor, olor del agua y no son eficaces en la eliminación de minerales, sales y compuestos inorgánicos disueltos, mientras que los filtros de carbón activado impregnados con plata coloidal son capaces de retener los mismos contaminantes que los filtros de carbón activado, que de manera adicional también inhiben los microorganismos que se presentan en dicha tabla. La lámpara UV<sub>254</sub> elimina el 99.99% de virus y bacterias que puedan estar presentes en el agua.

# 5. OBJETIVOS

## 5.1 General

>> Evaluar la potabilización de agua de lluvia empleando un sistema de barreras múltiples.

## 5.2 Particulares

>> Evaluar la variabilidad en la calidad del agua de lluvia después de ser sometida a un tratamiento de potabilización.

>> Comparar la eficiencia de remoción de cinco barreras múltiples que componen la planta de potabilización mediante el contenido de algunos contaminantes orgánicos e inorgánicos.

>> Determinar la mejor barrera de potabilización con base en la eficiencia de remoción de los parámetros previamente establecidos.

>> Efectuar una propuesta de planta potabilizadora para la AMC capaz de cubrir las necesidades de los usuarios.

## 5.3 Alcances y limitaciones

En el presente trabajo se determinaron los parámetros de absorbancia  $UV_{254}$ , alcalinidad total, COT, conductividad eléctrica, coliformes fecales, coliformes totales, color verdadero, DQO, dureza debida al calcio, dureza total, pH, sólidos disueltos totales (SDT) y turbiedad. Se operó una planta piloto para el tratamiento de potabilización del agua de lluvia captada conformada por pretratamiento y desinfección, evaluando el comportamiento de tres posibles barreras de pulimento instaladas de manera paralela; permitiendo elegir el tren más adecuado para el caso de estudio. Una vez concluida la evaluación de la planta piloto en cada una de sus etapas de tratamiento, se recopilan y exponen los resultados obtenidos para su aprobación, implementación, dimensionamiento, instalación y posterior arranque, lo cual se encontrará fuera de los alcances de este trabajo.

## 6. METODOLOGÍA

La Figura 4 muestra la estrategia general de trabajo que se siguió durante este trabajo de investigación. Es importante marcar que la Primera y Segunda Etapa del esquema se llevaban acabo los días de muestreo, mientras que los demás días se realizaba únicamente la Segunda Etapa, ya que no se acudía a las instalaciones de la AMC por muestras de agua. Finalmente, la Tercera Etapa se realizó cuando se concluyó la parte experimental de ésta investigación (Primera y Segunda Etapa).

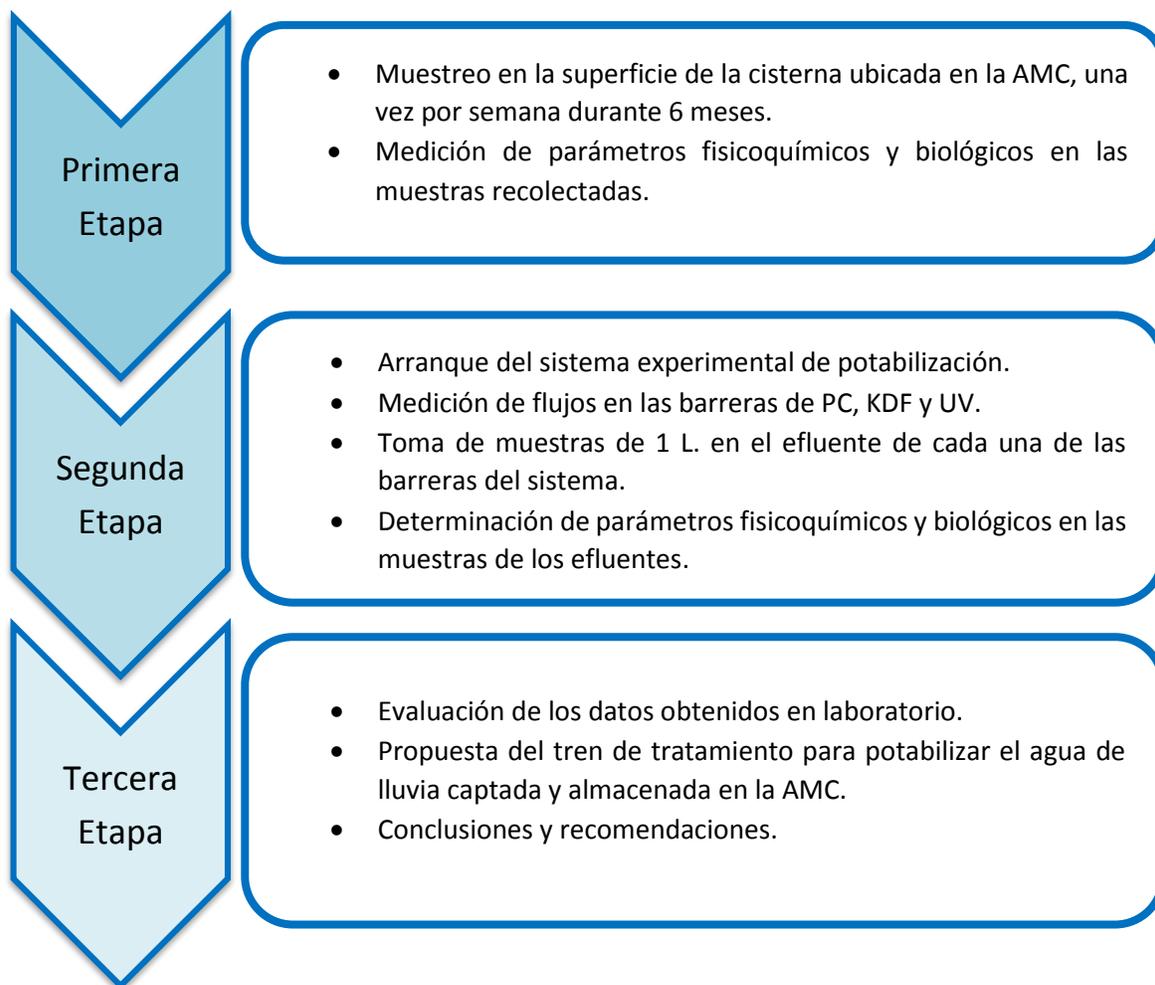


Figura 4. Esquema general de trabajo.

## 6.1 Sitio de muestreo

Las muestras de agua de éste estudio fueron tomadas en la Academia Mexicana de Ciencias (AMC) ubicada en la calle Cipreses s/n, km 23.5 de la carretera federal México-Cuernavaca, en la colonia San Andrés Totoltepec, alcaldía Tlalpan, en la Ciudad de México con coordenadas geográficas  $19^{\circ}14'30.32''$  Latitud N y  $99^{\circ}10'26.42''$  Longitud O, cuya ubicación puede ser observada a continuación dentro de la Figura 4.

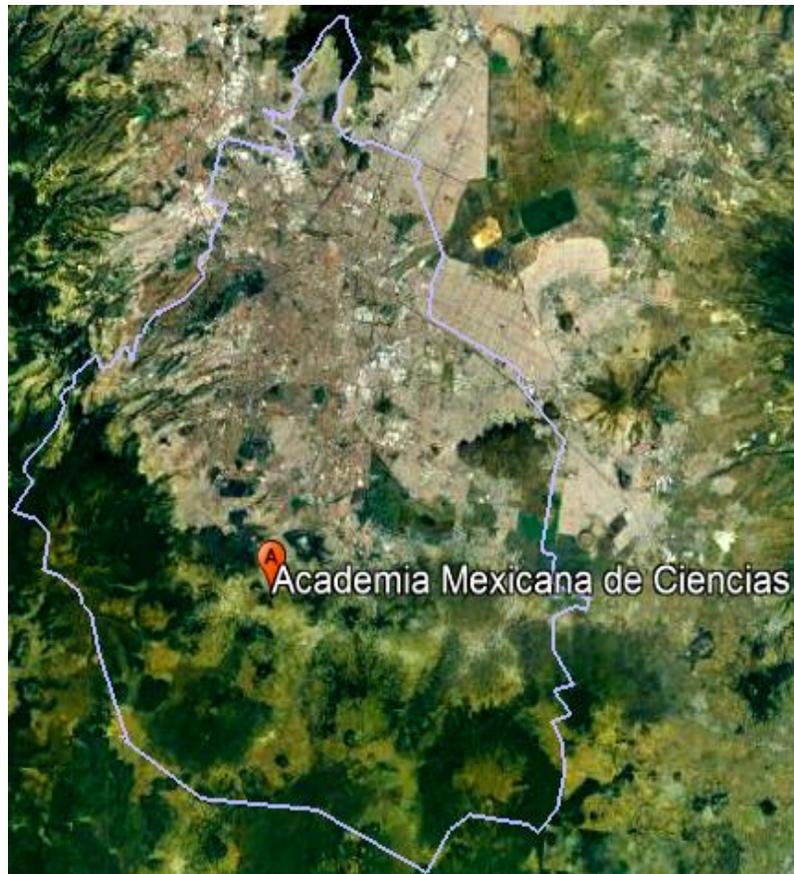


Figura 5. Localización de la AMC en la Ciudad de México. Fuente: Elaboración propia.

## 6.2 Condiciones climatológicas

Dentro de la alcaldía Tlalpan se presentan cinco subtipos de climas (Figura 5), el templado subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad en el 32.32% de la superficie, el templado subhúmedo con lluvias en verano de humedad media en el 6.39%, el templado subhúmedo con lluvias en verano de menor humedad en el 0.33%, el semifrío húmedo con abundantes lluvias en verano en el 17.17% y en el restante 43.79% se presenta un clima semifrío subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad. Se registra una precipitación promedio de 1,200 mm anuales en la alcaldía (IG & SEDESOL, 2011).

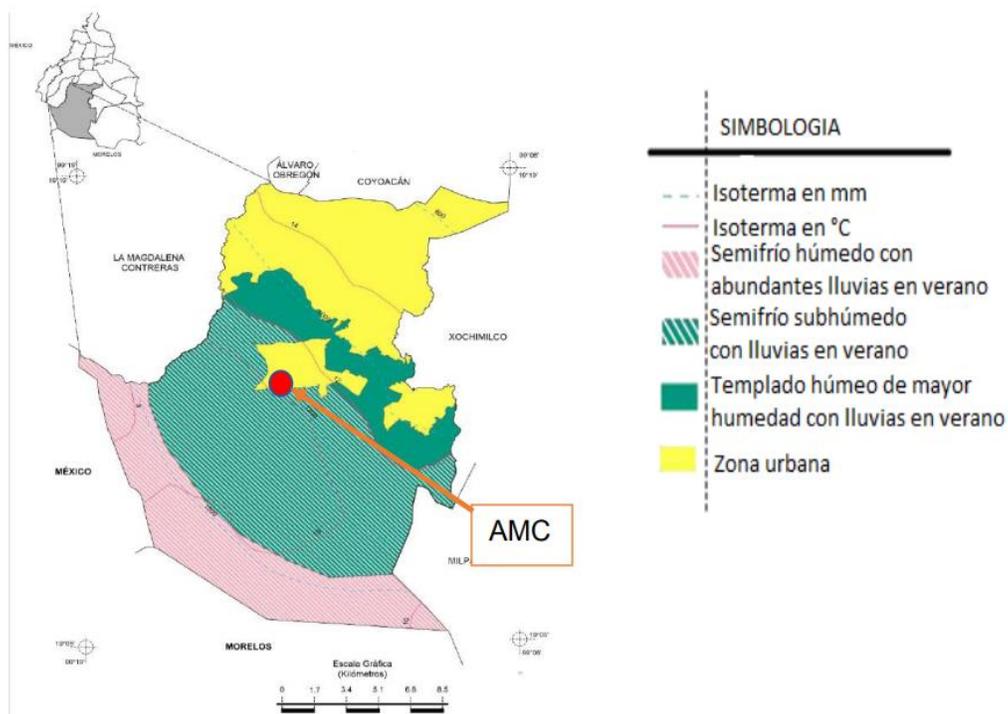


Figura 6. Clima de la alcaldía de Tlalpan y ubicación de la AMC. Fuente: Adaptado de INEGI, 2005.

Se recomienda que el nivel de precipitación mínimo requerido debe ser mayor a 1,000 mm anuales (la alcaldía Tlalpan excede ligeramente ese valor), por lo que la AMC es óptima para la implementación de sistemas de captación de agua de lluvia, que como se sabe dependen de la precipitación pluvial del lugar y de las características físicas del sistema de almacenamiento, sin embargo, no se debe olvidar realizar un análisis sobre el área de captación, el volumen necesario a administrar y el tamaño de los elementos de almacenamiento para verificar la viabilidad (Chávez & Mautner, 2016).

### 6.3 Sitio de muestreo.

El presente estudio se llevó a cabo con el agua lluvia captada en el auditorio “Galileo Galilei” de la AMC, y almacenada en la cisterna también localizada en dicho auditorio. Se tomaron muestras en la “superficie<sup>12</sup>” del reservorio. La Figura 6 presenta la localización del sitio de muestreo.



Figura 7. Ubicación del sitio de muestreo. Fuente: Elaboración propia.

### 6.4 Muestreo

Actualmente en México no existe normatividad que regule la frecuencia con la que se deben realizar muestreos para el agua de lluvia captada y almacenada. Valdivieso, *et al.*, (2011) recomienda que para realizar un estudio científico es necesario contar con un tamaño de muestra que ofrezca poder estadístico suficiente, mínimo tres muestreos, para sostener un análisis semanal y mensual del proceso de potabilización. Por lo anterior se decidió muestrear una vez por semana, durante un periodo comprendido del 25 de julio de 2017 al 23 de enero de 2018 (constituyendo un total de 22 muestras) aplicando los lineamientos y procedimientos que establece la norma oficial mexicana, NOM-014-SSA1-1993 “Procedimientos

---

<sup>12</sup> Espejo de agua del reservorio.

Sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados”.

La Figura 7 representa la cisterna de almacenamiento del agua de lluvia, ubicada en el interior del auditorio “*Galileo Galilei*”. En este punto, se tomaron un total de 1 L para la determinación de los parámetros biológicos, físicos y químicos, además de 40 L para la operación semanal de la planta piloto de potabilización.



**Figura 8. Cisterna de almacenamiento del agua de lluvia, ubicada en el interior del auditorio "Galileo Galilei". Fuente: Elaboración propia.**

De esta manera, el muestreo efectuado en la “superficie” del reservorio, se eligió este punto debido a que Abbasi & Abbasi (2011) reportan que en tanques destinados para el almacenamiento del agua de lluvia ocurre precipitación y sedimentación de metales pesados y materia suspendida debido a su alta densidad. También mencionan que la materia orgánica al ser menos densa que el agua, inicialmente flota en la parte superior, pero finalmente se satura con agua para después precipitar y con ello reducir la turbiedad en la superficie, lo que facilita la desinfección del agua. Por otro lado, investigaciones desarrolladas por Romero (2017) y Bello (2018) concluyeron que el agua de la superficie en la cisterna de la AMC presenta concentraciones bajas (comparadas con el fondo de la misma cisterna) de contaminantes de interés para este estudio.

Para todos los eventos se llevó a cabo la caracterización por duplicado de los parámetros físicos y químicos, tales como: absorbancia  $UV_{254}$ , alcalinidad total, color

aparente, color verdadero, conductividad eléctrica, dureza al calcio, dureza total, pH, SDT y turbiedad. Los parámetros biológicos (coliformes totales y fecales), COT y DQO fueron determinados una vez.

### 6.5 Caracterización del agua de lluvia.

Una vez recolectadas las muestras de agua de lluvia de la cisterna se transportaron al Laboratorio de Ingeniería Ambiental (LIA) en una hielera a una temperatura de 4°C, ubicado en el Edificio número 5 del Instituto de Ingeniería-UNAM para la determinación de las pruebas fisicoquímicas y biológicas para su caracterización.

La absorbancia  $UV_{254}$  se determinó con celdas de cuarzo rectangulares de 10 mm en un espectrofotómetro de la marca HACH modelo DR 5000 con una longitud de onda de 254 nm como se puede observar en la Figura 8.



**Figura 9. Espectrofotómetro DR 5000 para la determinación de absorbancia  $UV_{254}$  y color en las muestras de agua. Fuente: Elaboración propia.**

La alcalinidad total fue determinada siguiendo lo establecido en la NMX-AA-036-SCFI-2001 “Análisis de agua-determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas” (ver Figura 9) y así como el método número 2320 de Standard Methods for the examination of water and wastewater (APHA, 1998).



**Figura 10. Determinación de alcalinidad total por cambio de color de amarillo pajizo a rojo canela mediante titulación de  $H_2SO_4$  en las muestras de agua. Fuente: Elaboración propia.**

El parámetro COT se determinó mediante el método directo 10129 (HACH, 2003) como se puede observar en la Figura 10 y de acuerdo a las instrucciones del fabricante. Por otra parte la DQO se determinó empleando el método 8000 (HACH, 2003) siguiendo las especificaciones del fabricante.

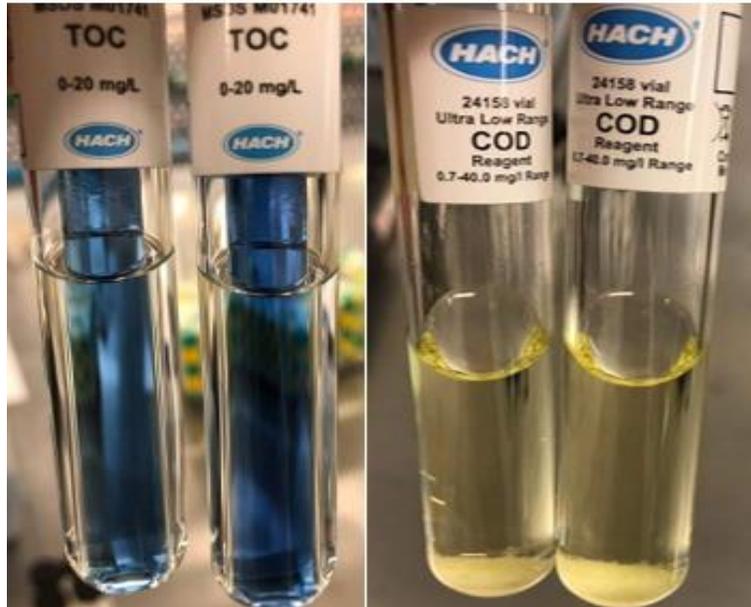


Figura 11. Viales digeridos de la marca HACH para determinación de COT (lado izquierdo) y DQO (lado derecho) en las muestras de agua. Fuente: Elaboración propia.

Para la cuantificación de los coliformes totales y fecales se empleó el el kit de pruebas Simplate® *Total Plate Count Color Indicator* (ver Figura 11) siguiendo la metodología establecida por el fabricante.

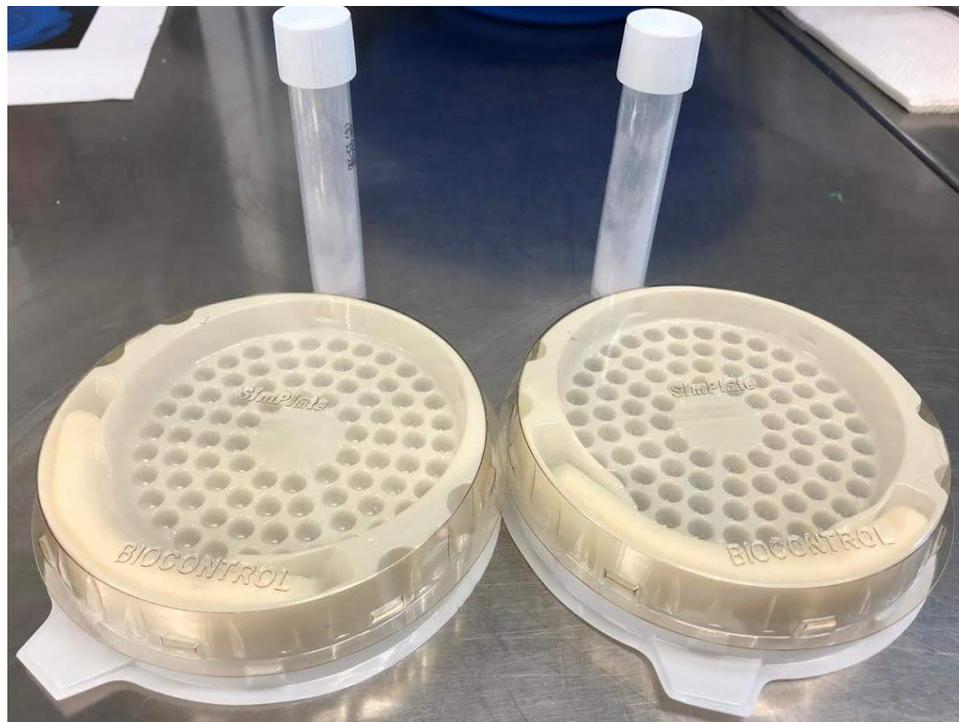


Figura 12. Kit de pruebas Simplate Total Plate Count Color Indicator para la determinación de coliformes fecales y totales en las muestras de agua. Fuente: Elaboración propia.

El color verdadero fue medido en un espectrofotómetro de la marca HACH modelo DR 5000 siguiendo el método de platino-cobalto 8025 (HACH, 2003) y en la NOM-AA-045-SCFI-2001 “Análisis de agua - determinación de color platino-cobalto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas”.

La conductividad eléctrica, SDT y pH se analizaron inmediatamente al llegar a el laboratorio. El pH, conductividad electrolítica y los sólidos disueltos totales fueron medidos con un multiparámetro de la marca OAKTON PC 450 (ver Figura 12) y siguiendo los métodos presentados en la NOM-AA-008-SCFI-2000 “Análisis de agua-determinación del pH” y NOM-AA-093-SCFI-2000 “Análisis de agua-determinación de la conductividad electrolítica”, respectivamente.



**Figura 13. Multiparámetro de la marca OAKTON empleado para la determinación de conductividad eléctrica, SDT y pH. Fuente: Elaboración propia.**

La dureza total y la dureza al calcio fueron determinadas acorde a lo establecido en la NOM-AA-072-SCFI-2001 “Análisis de agua-determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas” así como los métodos 2340 y

3500-Ca (ver Figura 13). Para determinar la concentración del ión calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) expresada como  $\text{mg CaCO}_3/\text{L}$  *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (APHA, 1998) respectivamente. La dureza debida al ión magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) expresada como  $\text{mg CaCO}_3/\text{L}$  fue calculada como la diferencia de la dureza total menos la dureza debida al ión calcio (APHA, 1998).



**Figura 14. Determinación de dureza total y dureza debida al ión calcio en las muestras de agua. Fuente: Elaboración propia.**

Los SDT se determinaron siguiendo lo establecido en la NMX-AA-034-SCFI-2015 “Análisis de agua-medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas” como se muestra en la Figura 14.

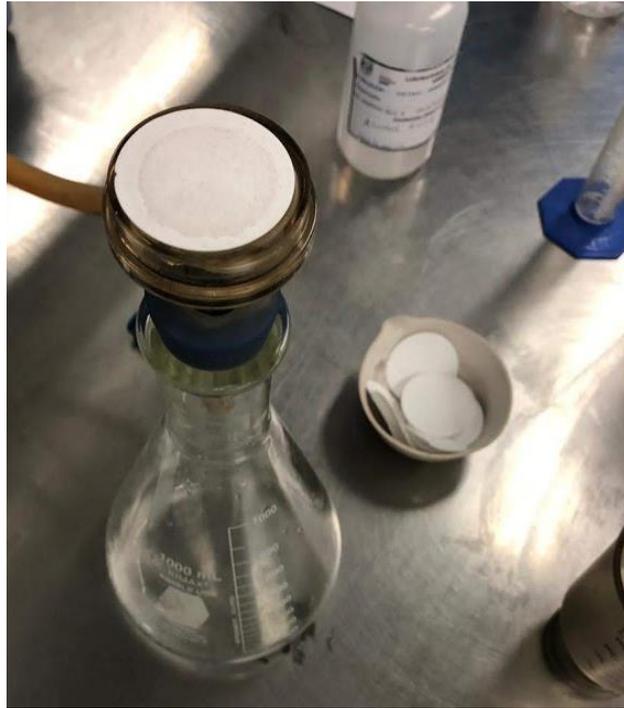


Figura 15. Determinación de SDT en las muestras de agua. Fuente: Elaboración propia.

La turbiedad fue medida con un turbidímetro de la marca HACH modelo 2100N (ver Figura 15) siguiendo el método descrito en la NXM-AA-038-SCFI-2001 “Análisis de agua-determinación de la turbiedad en agua naturales, residuales y residuales tratadas”.



Figura 16. Turbidímetro HACH 2100N empleado en la determinación de turbiedad en las muestras de agua. Fuente: Elaboración propia.

## 6.6 Evaluación del sistema piloto de potabilización para el agua de lluvia captada

Es importante garantizar la seguridad y calidad del agua ya que de no ser así, la comunidad puede quedar expuesta al riesgo de brotes de enfermedades intestinales y otras enfermedades infecciosas. Particularmente es importante evitar los brotes de enfermedades transmitidas por el agua de consumo, dada su capacidad de infectar simultáneamente a un gran número de personas y potencialmente a una gran proporción de la población (OMS, 2006).

Como se mencionó anteriormente, el estudio se realizó en las instalaciones del Instituto de Ingeniería-UNAM ubicadas en la Ciudad de México con una temperatura media anual de 16 °C (INEGI, 2017). La planta piloto se encuentra colocada sobre una base de madera con soportes metálicos que sostiene a las barreras que conforman el pretratamiento (FA y CA) y el tratamiento de desinfección (PC, KDF y UV), cuentan con las características que se detallan en la Tabla 6.

**Tabla 6. Características de los filtros utilizados en el pretratamiento y desinfección.**

CLAVE	BARRERA A BASE DE FILTROS	CARACTERÍSTICAS
<b>Pre tratamiento (operación en serie)</b>		
FA	Arena	Cartucho rellenable de 2.5" x 10", de flujo ascendente de un solo medio filtrante (arena). Distribución del material en el medio: grava 25%, arena 60% y 15% de espacio para la expansión del material.
CA	Carbón Activado	Cartucho de carbón activado en bloque de 2.5" x 10" de 10 µm.
<b>Desinfección (operación en paralelo)</b>		
PC	CA con plata coloidal	Cartucho de carbón impregnado de plata en bloque de 2.2" x 10" de 0.5 µm.
KDF	Gránulos de gran pureza de cobre-zinc	Cartucho de KDF bacteriostático de aleación cobre-zinc.
UV	Lámpara Ultra Violeta 254 nm	Lámpara UV Polaris de acero inoxidable 304 modelo UVA 1-C de 3.78 L/min con un consumo de energía de 10 W.

Con el fin de evaluar la variabilidad en la calidad del agua después de cada una de las etapas de tratamiento así como la eficiencia del sistema, se consideraron puntos de muestreo se que se ubican a la salida de cada barrera que conforman el sistema

de potabilización (Figura 16), los cuales fueron nombrados de la misma manera que la barrera de donde provienen; FA, CA, PC, KDF y UV, respectivamente.



Figura 17. Sistema piloto para la potabilización del agua de lluvia captada en la AMC. Fuente: Elaboración propia.

### 6.7 Operación de la planta para la potabilización del agua de lluvia

A partir del 26 de julio de 2017 y hasta el 23 de enero de 2018 (seis meses), se muestreo en la parte superficial del tanque 40 L de agua de lluvia que se utilizaron para operar la planta de potabilización a lo largo de la semana, el agua que no se empleaba era almacenada a una temperatura de 4 °C en la cámara fría para su posterior uso.

El volumen potabilizado por el sistema fue de 8 L/d, valor que es equivalente al requerimiento mínimo de agua para el consumo humano basándose en la suposición de que un adulto consume 2 L/d de agua potable (WHO, 2003) y considerando 4 habitantes en promedio por vivienda en México (INEGI, 2016).

El sistema de potabilización fue alimentado diariamente con el agua de lluvia contenida en un garrafón de 20 L (ver Figura 16). El agua fue conducida hacia la planta piloto mediante una bomba peristáltica, primeramente era alimentado el FA, después el filtro de CA, operan en serie, y finalmente las barreras de desinfección (KDF, PC y UV) que fueron alimentadas de manera paralela con el efluente del CA.

La planta operó durante 20 minutos diarios por 24 semanas, es decir un total de 60 horas. Cada día de operación, se registraba la hora de inicio y fin de la corrida, se consideraron 5 minutos más para que el sistema logre el régimen permanente, y así continuar con la medición del flujo en cada una de las barreras de desinfección (ver Figura 17). Una vez hecho lo anterior se tomaba un 1 L de muestra del efluente resultante de cada una de las barreras del pretratamiento y la desinfección para su posterior caracterización, dando un total de 600 muestras.



**Figura 18. Medición de flujo en la barrera UV del sistema de potabilización. Fuente: Elaboración propia.**

Para la caracterización de los efluentes se determinaron por duplicado los siguientes parámetros: absorbancia  $UV_{254}$ , alcalinidad total, color verdadero, conductividad eléctrica, dureza al calcio, dureza total, SDT, pH y turbiedad.

Para los parámetros COT, coliformes fecales y totales, así como la DQO fueron medidos solamente una vez debido al costo elevado de los kits para su determinación. La Figura 18 muestra la toma de muestra para la determinación de coliformes fecales y totales.



**Figura 19. Toma de muestra para la determinación de los parámetros coliformes totales y coliformes fecales. Fuente: Elaboración propia.**

## 6.8 Mantenimiento y reemplazo de los cartuchos del sistema de potabilización

Para el mantenimiento del sistema, el criterio que se tomó para el lavado del lecho filtrante del FA, reemplazo de los cartuchos de los filtros de CA, PC y UV, así como para realizar retrolavados al filtro KDF fue, la disminución del flujo de agua a la salida de cada barrera del sistema de potabilización y el valor de turbiedad, lo que significaba la acumulación de los sólidos suspendidos en el lecho filtrante (ver Figura 20) ó en el cartucho y la necesidad de realizar un cambio. En la Tabla 7 se muestra de manera resumida el mantenimiento mínimo necesario para cada una de las barreras.

**Tabla 7. Mantenimiento mínimo de las barreras que conforman el sistema de potabilización.**

<b>CLAVE</b>	<b>MATENIMIENTO</b>
<b>FA</b>	Retirar por completo el lecho filtrante (arena y grava) para su posterior lavado con agua destilada (mínimo realizar tres lavados) y secar por completo <sup>13</sup> con la ayuda de una estufa a 96°C. Lavar con agua y cepillo la cabeza del vaso y la cabeza del filtro.
<b>CA</b>	Lavar con agua y cepillo la cabeza del vaso y la cabeza del filtro y reemplazar el cartucho completo por uno nuevo cuando se identifique una disminución del flujo de salida.
<b>PC</b>	Lavar con agua y cepillo la cabeza del vaso y la cabeza del filtro y reemplazar el cartucho completo por uno nuevo cuando se identifique una disminución considerable del flujo de salida.
<b>KDF</b>	Cuando el flujo de agua disminuya significativamente, lavar el filtro con flujo invertido de agua destilada a presión (retrolavado) como mínimo tres veces.
<b>UV</b>	El cambio del cartucho se debe realizar por lo menos cada seis meses o después de haber filtrado 2,000 litros de agua. Es indispensable que el tubo de cuarzo esté perfectamente limpio y se debe lavar remojándolo en agua jabonosa (durante un día), enjuagar y secar totalmente; nunca se debe utilizar solventes o agua caliente.

<sup>13</sup> Mantener la grava y la arena dentro de una estufa a 85°C durante una semana para garantizar el secado completo.

Cabe mencionar que se debe tener especial cuidado en la extracción y posterior colocación de la capa de grava, a fin de evitar su mezcla con la arena. Si esto sucede, la grava debe ser retirada, tamizada y colocada nuevamente en correcto orden. La mezcla de los medios filtrantes origina un lecho no estratificado<sup>14</sup>, que puede implicar menor eficiencia de remoción.



**Figura 20. Cartucho de CA saturado con sólidos no disueltos. Fuente: Elaboración propia.**

## **6.9 Análisis de varianza (ANOVA)**

El análisis de la varianza permitió contrastar particularmente para los parámetros que en la investigación de Bello (2018) sobrepasan los límites máximos permisibles en la NOM-127-SSA1-1994, la hipótesis nula ( $H_0$ ), en la que se establece que no existe diferencia significativa con un nivel de confianza del 95% entre la calidad del agua de lluvia a la entrada, con respecto a su salida en cada etapa del sistema de potabilización [pretratamiento (FA y CA), filtro PC, filtro KDF y filtro UV], frente a la

---

<sup>14</sup> La Real Academia Española (2017) define a estratificar como disponer o colocar en capas.

hipótesis alterna ( $H_1$ ), la cual establece que existe diferencia significativa entre la calidad del agua de lluvia a la entrada, con respecto a su salida en cada etapa del sistema de potabilización.

Se utilizó una prueba de hipótesis de  $f_{\text{Fisher}}$  para verificar si existen diferencias estadísticamente significativas en la remoción de los contaminantes en los tratamientos que conforman el sistema de potabilización, para más detalle ver Anexo 1. Se empleó un análisis de varianza ya que se tienen muestras de 87 datos ( $n=87$ ). Con un nivel de significancia de:  $\alpha=0.05$

## 6.10 Balance de masa

Para efectuar el balance de masa del proceso de potabilización, se delimitaron los sistemas donde aplicó.

Un sistema hace referencia a la porción arbitraria del proceso que se estableció específicamente para el análisis. Se hizo la consideración de que los sistemas son abiertos<sup>15</sup>. A diferencia del análisis de varianza, el balance de masa se aplicó a cada una de las barreras del tren de potabilización.

Se tomaron las concentraciones promedio de los contaminantes (propiedades extensivas<sup>16</sup>) a los 87 días de operación del tren de potabilización, cabe reclacar que se tomó el acumulado del tiempo de operación del tren a los 87 días (1740 minutos).

Las barreras que conforman la etapa de pretratamiento (FA y CA) así como las tres barreras de desinfección (PC, KDF y UV) se comportan como un sistema abierto estacionario por lo que el balance de masa se puede resumir como; entradas por los límites del sistema son iguales a salidas por los límites del sistema. La Figura 21

---

<sup>15</sup> Un sistema abierto es aquel en el que existe transferencia de masa a través de los límites del mismo, entra masa y sale masa.

<sup>16</sup> Cuando la propiedad intensiva se multiplica por la cantidad de sustancia (masa) se tiene una propiedad que sí depende de la cantidad de sustancia presente y se llama propiedad extensiva.

muestra el diagrama de flujo del sistema de potabilización, así como variables de importancia para el balance de masa.

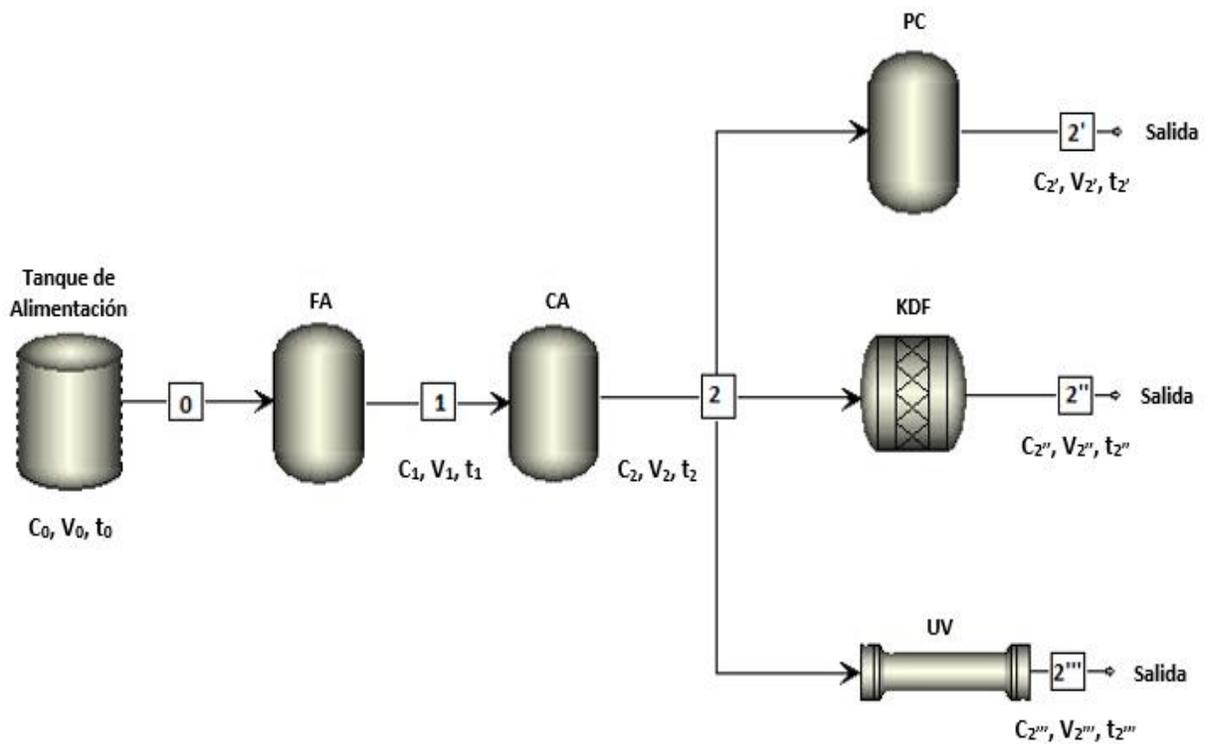


Figura 21. Diagrama de flujo del sistema de potabilización. Fuente: Elaboración propia.

La Ecuación 1, 2, 3, 4 y 5 presentan el planteamiento del balance de masa para el sistema de potabilización en cada una de las barreras del sistema de potabilización.

Masa retenida (gramo) de contaminante en FA:

$$C_0V_0 - C_1V_1 = (C_0 - C_1) * V_1 \quad \text{(Ec. 1)}$$

Masa retenida (gramo) de contaminante en CA:

$$C_1V_1 - C_2V_2 = (C_1 - C_2) * V_2 \quad \text{(Ec. 2)}$$

Masa retenida (gramo) de contaminante en PC:

$$C_2V_2 - C_2'V_2' = (C_2 - C_3) * V_2, \quad \text{(Ec. 3)}$$

Masa retenida (gramo) de contaminante en KDF:

$$C_2V_2 - C_{2''}V_{2''} = (C_2 - C_4)V_{2'''} \quad (\text{Ec. 4})$$

Masa retenida (gramo) de contaminante en UV:

$$C_2V_2 - C_{2'''}V_{2'''} = (C_2 - C_{2'''}) * V_{2'''} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

$C_x$  = concentración del contaminante en la corriente, en mg/L.

$V_x$  = volumen de agua total tratado, en L.

Las eficiencias de remoción de las barreras ( $\eta_{\text{remoción}}$ ) fueron calculadas con la Ecuación 6.

$$\eta_{\text{remoción}} = \left( \frac{A - B}{A} \right) * 100 \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

A = concentración de entrada de contaminantes, en mg/L.

B = concentración de salida de contaminantes, en mg/L.

## 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para éste estudio sólo se consideraron algunos parámetros de calidad de agua para uso y consumo humano tales como absorbancia  $UV_{254}$ , alcalinidad total, carbono orgánico total (COT), coliformes fecales, coliformes totales, color verdadero, conductividad eléctrica, DQO, dureza al calcio, dureza total, pH, SDT y turbiedad para el agua de lluvia captada y en el agua resultante de cada una de las barreras que conforman los sistemas de pre tratamiento y desinfección. Como se mencionó anteriormente, el agua de lluvia tiene un pH cercano a neutro, posee poca dureza, no contiene subproductos de desinfección, contaminantes generados por el hombre y el área de captación y muestreo estaban a salvo de pesticidas, materiales radiactivos, cloro y a productos químicos orgánicos; por lo tanto, los parámetros relacionados fueron excluidos del análisis de la calidad del agua de lluvia en esta investigación.

El comportamiento de absorbancia  $UV_{254}$ , alcalinidad total, COT y DQO antes y después de que el agua fue sometida al proceso de potabilización se muestran en las Figuras 22, 23, 24 y 25, respectivamente, mientras que coliformes totales, color verdadero, conductividad eléctrica y SDT en las Figuras 26, 27, 28 y 29 respectivamente y dureza total, pH y turbiedad en las Figuras 30, 31 y 32 respectivamente. En cada una de ellas se hace la comparación de los resultados obtenidos de cada indicador con relación a los criterios de calidad admisibles para la destinación al empleo humano y doméstico establecido en la modificación a la NOM-127-SSA1-1994.

La Figura 22 muestra los resultados obtenidos para el parámetro Absorbancia  $UV_{254}$  que como se sabe es un método eficaz para la monitorización de la carga orgánica en el agua, ya que muchas sustancias orgánicas absorben la luz UV a esa longitud de onda (HACH, 2016) y luz  $UV_{254}$  absorbida se utilizó para monitorizar los niveles de materia orgánica de origen natural. Este parámetro es de vital importancia debido a que la materia orgánica es una de las impurezas más frecuente en las fuentes de agua y afecta al color, sabor y el olor del agua.

Como se observa en la Figura 22 es posible notar que el mejor desempeño en la etapa de desinfección fue la lámpara UV siendo capaz de reducir el hasta el 95%, mientras que el PC reduce el 94% y el KDF el 88% con respecto al valor de entrada ( $4.89 \text{ cm}^{-1}$ ). Por lo que se puede decir que el PC y la lámpara UV posee una función importante dentro del proceso, retener materia orgánica.

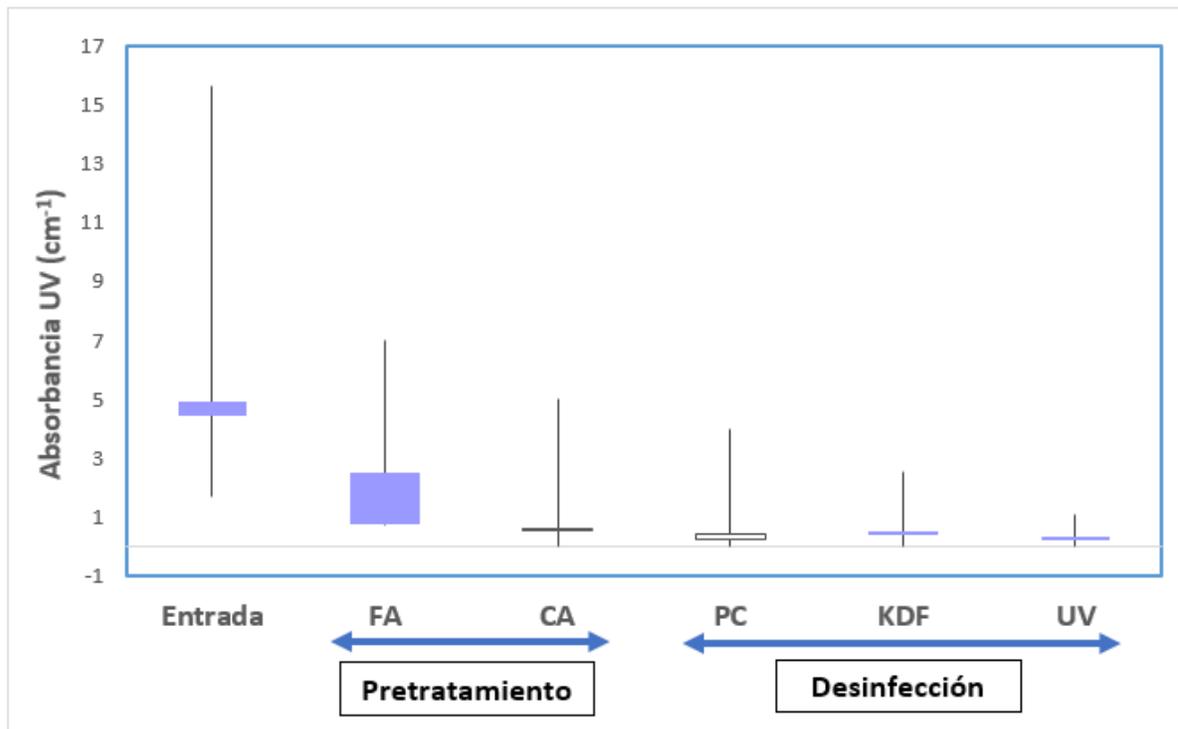


Figura 22. Comparación de Absorbancia UV254 a la entrada del sistema de potabilización y salida en cada barrera.

Actualmente se presenta la tendencia para evaluar el contenido de materia orgánica mediante la técnica de Absorbancia UV<sub>254</sub>, ya que representa una aproximación bastante acertada al carbono orgánico existente en las muestras de agua, además de que es una técnica simple, rápida y de resultados reproducibles (Satué & Díaz, 2000).

La alcalinidad total es otro parámetro importante de controlar, ya que ayuda a verificar si el agua presenta la concentración adecuada de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos que hacen que no disminuya el pH en presencia de ácidos. Es decir, se debe verificar y controlar que el agua no sea propensa a acidificarse, ya que de lo contrario dejaría de ser potable.

La Figura 23 indica que solamente existe una remoción efectiva de alcalinidad en la etapa del pre tratamiento, siendo la barrera más eficiente el CA debido a que los iones que aportan alcalinidad ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{OH}^-$ ) al agua son adheridos en la superficie del carbón activado (adsorción).

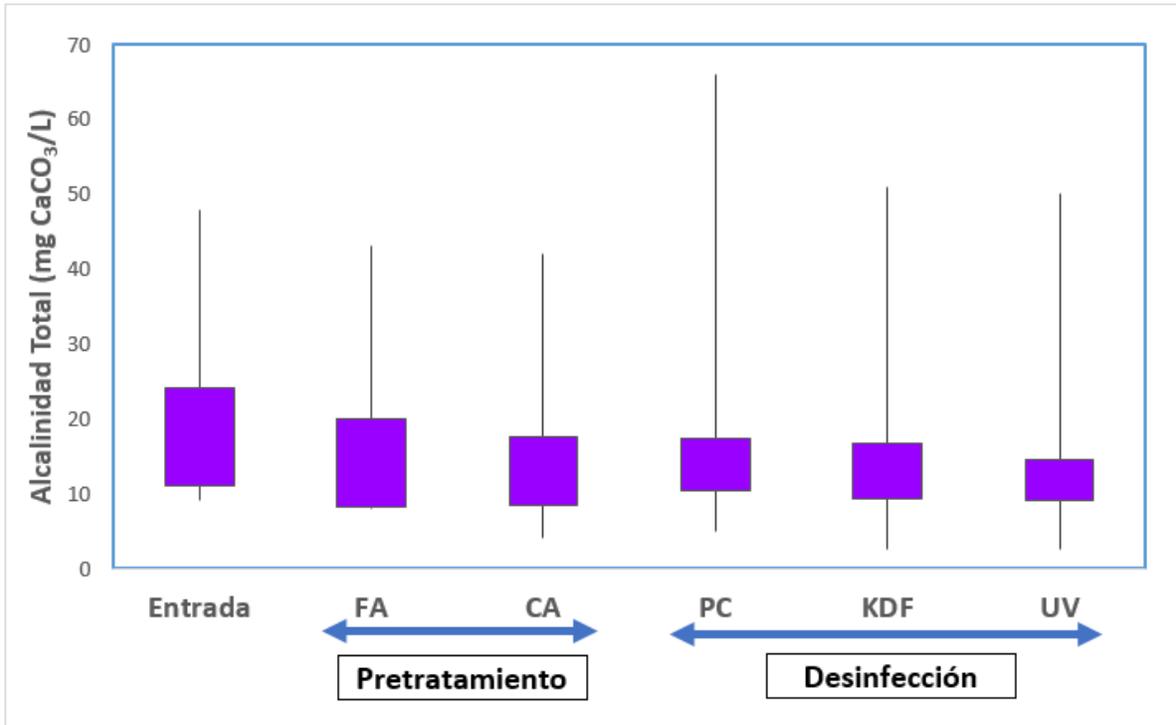


Figura 23. Comparación de Alcalinidad a la entrada del sistema de potabilización y salida en cada barrera.

En las tres etapas de desinfección existe una notoria dispersión en la concentración de alcalinidad total, siendo PC el que presenta mayores incrementos a lo largo de este estudio (valor máximo de 66 mgCaCO<sub>3</sub>/L) en el mes de enero de 2018. Se atribuye que el incremento en la concentración de alcalinidad en el filtro PC sea ocasionado al atascamiento en ciertas zonas en el filtro, dejando un paso reducido al agua y la filtración se efectúa localmente, con más rapidez y menos eficacia (Orellana, 2005) o también a la posible incrustación en la superficie interna de las tuberías y en consecuencia arrastre de sólidos no disueltos en el efluente (Cruz, 2015).

La barrera que presenta un mejor desempeño en la etapa de desinfección es UV con una eficiencia promedio de 23.56%.

Las Figuras 24 y 25 muestran los resultados obtenidos para COT y DQO, respectivamente, en ellas podemos observar que el filtro con CA resulta eficiente para remover este parámetro alcanzando una eficiencia de 90%, mientras que en la etapa de desinfección la mejor barrera fue UV debido a que la radiación ultravioleta es capaz de biodegradar los posibles compuestos orgánicos en el agua (Rodriguez, *et al.*, 2008). De hecho, la misma tendencia se observa para la DQO presentado mejores desempeños la barrera CA en el pre tratamiento y UV en la etapa de desinfección. Los incrementos bruscos de COT y DQO a la salida del filtro PC, son atribuidos a una disminución de la capacidad de adsorción del material con el paso del tiempo y las jordanas laborales, esto puede ser resultado de la biomasa bacteriana no adsorbida de acuerdo con lo reportado por Zani, *et al.*, 2005 y se sugiere el reemplazo del cartucho correspondiente.

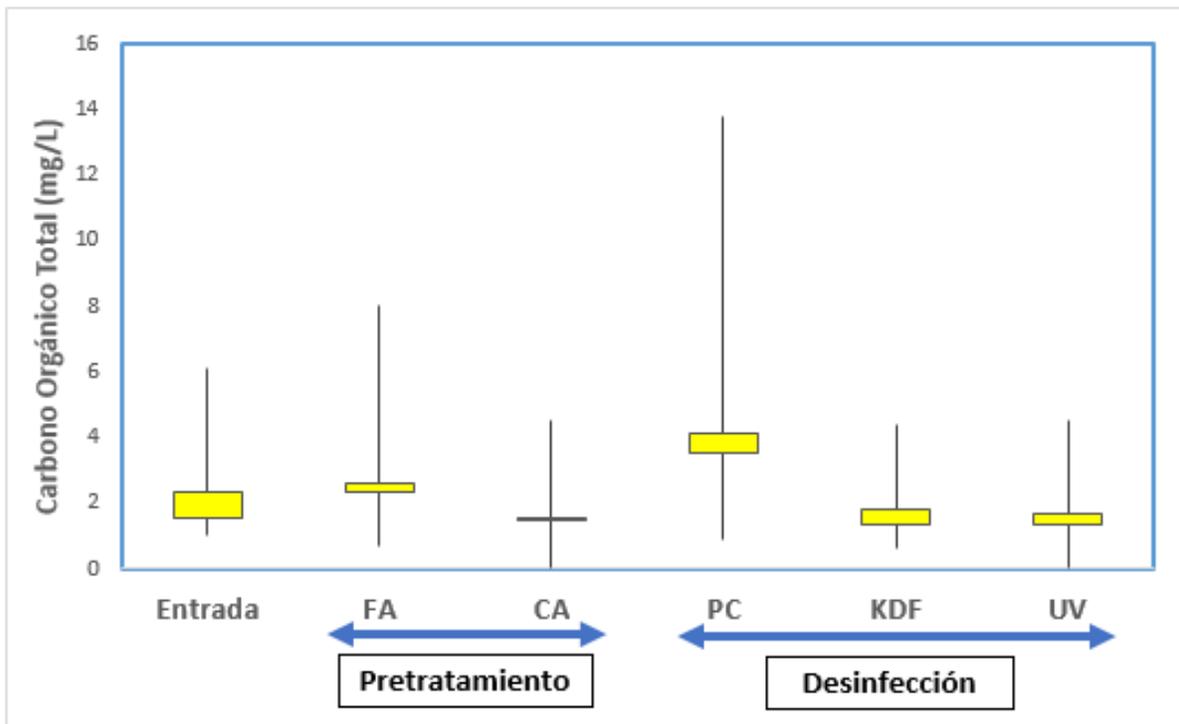


Figura 24. Comparación de Carbono Orgánico Total a la entrada del sistema de potabilización y salida en cada barrera.

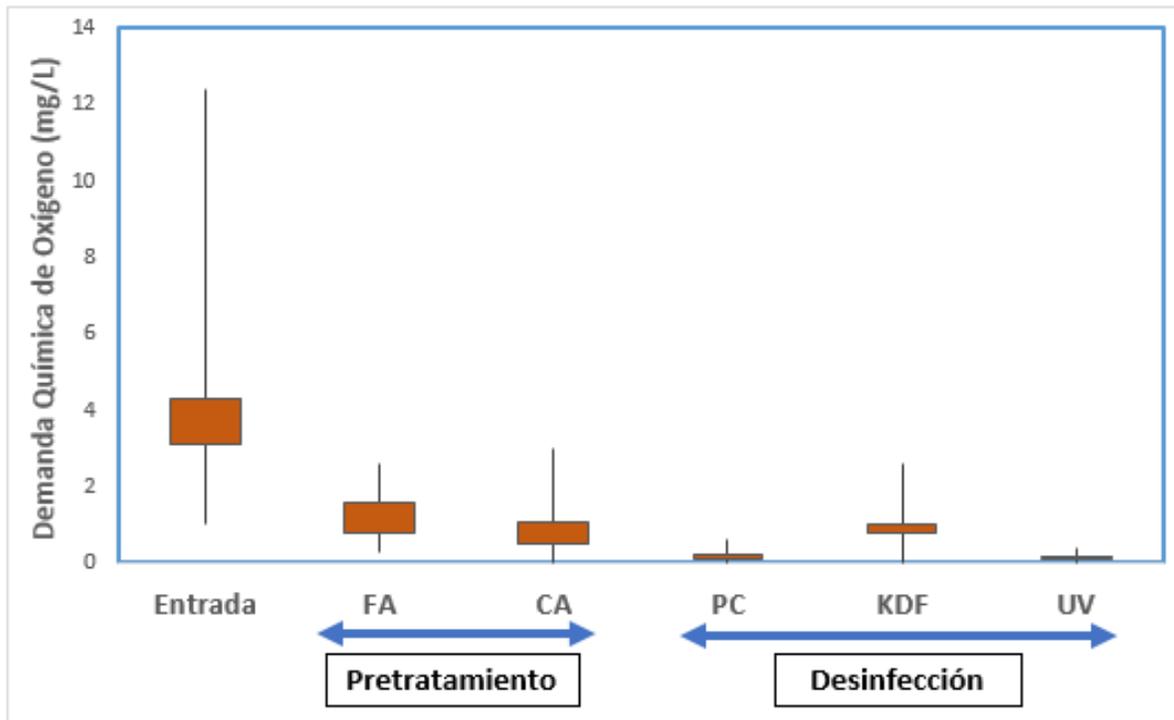


Figura 25. Comparación de Demanda Química de Oxígeno a la entrada del sistema de potabilización y salida en cada barrera.

Por otro lado, los parámetros microbiológicos son de gran importancia cuando se considera que la calidad del agua es el peligro más común en las fuentes de agua obtenidas de techos es la contaminación microbiana y por patógenos entéricos (virus, bacterias y protozoos) que ocasionan enfermedades gastrointestinales (RAIN-foundation, 2008). La Figura 26 evidencia en el agua muestreada en la superficie del reservorio (alimentación del sistema de potabilización) presenta baja concentración de coliformes totales y ausencia de fecales. Los CT presentes fueron destruidos, debido a la eficacia como bactericida del filtro de carbón activado impregnado con plata coloidal (Pérez, *et al.*, 2014), o a que la lámina destinada para la captación del agua de lluvia reflejaba la radiación solar que incidía sobre ella, ocasionando muerte celular por la rotura de la membrana celular, además se agrega irradiación ultravioleta ( $UV_{254}$ ) que se puede considerar como una alternativa a la desinfección química (con cloro). De hecho, la radiación UV es particularmente efectiva para inactivar *Cryptosporidium* sp. (OMS, 2017) que es resistente a la cloración, pero la desventaja que presenta es que no proporciona una desinfección residual, por lo que consideraría apropiado agregar una pequeña dosis de un desinfectante persistente para lograr la inactivación de microorganismos (Costa, *et*

al., 2014). En consecuencia, facilita la remoción de los contaminantes biológicos a través del sistema.

El incremento en la concentración de coliformes totales observado en el FA fue atribuido a un probable crecimiento de microorganismos en el lecho filtrante, especialmente si no existe mantenimiento adecuado o bien, el lecho filtrante no es sustituido a tiempo (Zani, *et al.*, 2005). El ligero incremento en la concentración de coliformes totales en el FA y sugiere que es ocasionado por la biomasa bacteriana no adsorbida en el filtro así como su acumulación y desprendimiento del lecho filtrante (Zani, *et al.*, 2005). Las tres barreras de desinfección (KDF, PC y UV) fueron eficientes en la remoción de coliformes fecales y totales con respecto al valor promedio de entrada (0.57 UFC/100 mL) al sistema de potabilización.

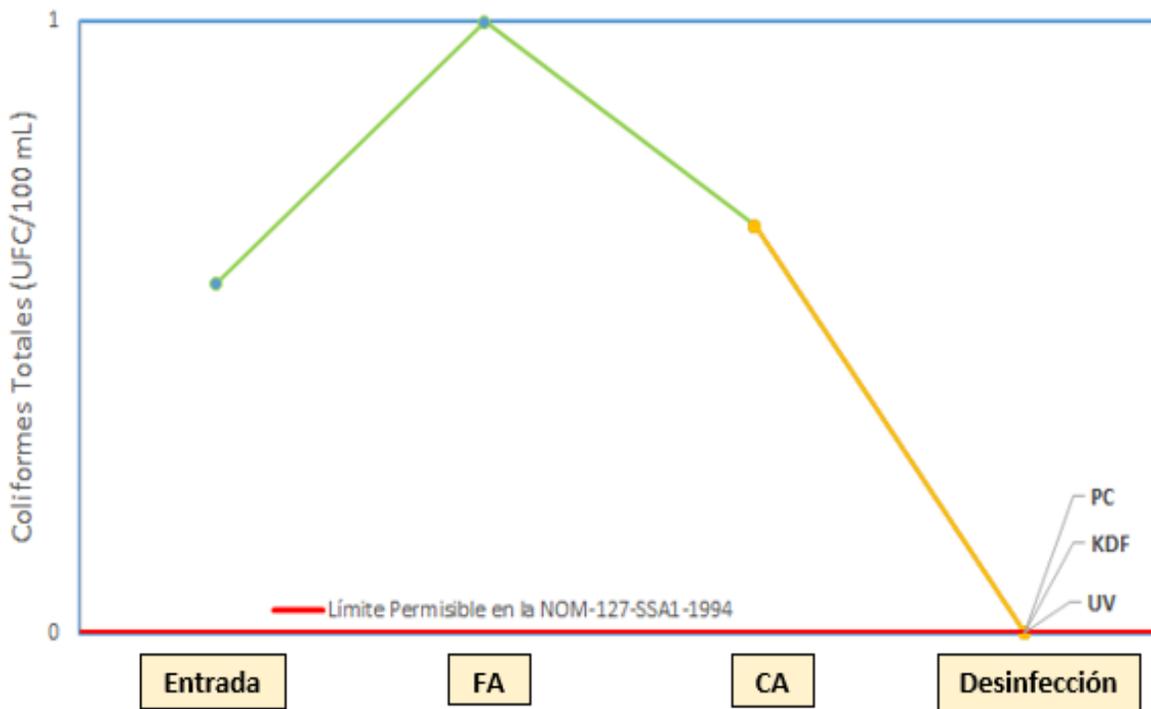


Figura 26. Comparación de Coliformes Totales a la entrada del sistema de potabilización y salida en cada barrera.

Los resultados obtenidos para el parámetro color verdadero se muestran en la Figura 27, en ella se observa que a la salida del pretratamiento y a la salida de las tres distintas barreras de desinfección nunca se rebasa el valor de 20 unidades Pt-Co establecido por la normatividad mexicana. Con respecto a la eficiencia del FA,

presenta una remoción del 41% y el CA del 32.52% con respecto a la concentración del influente (9.51 unidades Pt-Co).

Con relación a la etapa de desinfección, la barrera que presenta una eficiencia mayor en este parámetro es UV siendo capaz de remover el 33%, seguido por el filtro PC con una eficiencia de 29.6% y por último KDF con el 17.65% con respecto al valor de entrada que fue de 9.51 unidades Pt-Co. El valor de color verdadero indica la existencia de baja concentración de materia orgánica lo que facilita la desinfección del agua de lluvia en el proceso de potabilización (Shelton, 1989).

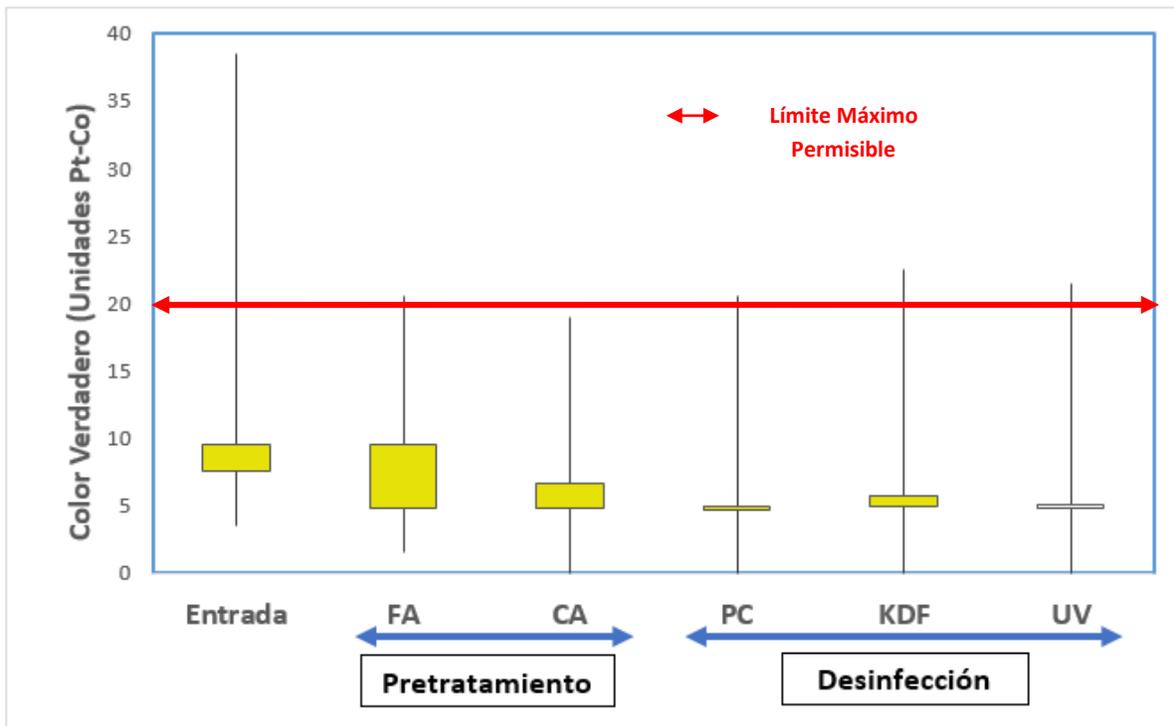


Figura 27. Comparación de Color Verdadero a la entrada del sistema de potabilización y salida en cada barrera.

Con respecto a las muestras tomadas a las salidas del pretratamiento y en las barreras de desinfección, la Figura 28 muestra que la conductividad eléctrica está íntimamente relacionada con los SDT (Figura 29) en los mismos puntos de muestreo. La variación en la conductividad eléctrica a la salida del CA se atribuye a que no es eficiente en la remoción de material disuelto, debido a que el tamaño de las partículas es inferior al tamaño de su poro. Para el caso del PC, KDF y UV la concentración de SDT disminuyen en promedio 12.58%, 4.64% y 7.09% respectivamente, con respecto al valor de entrada del agua y por lo que el efluente

resultante se encuentra dentro del límite máximo permisible (1000 mg/L) establecido en la modificación de la NOM-127-SSA1-1994 para sólidos disueltos totales. Todas las muestras tomadas a lo largo de este estudio (superficie del sistema de almacenamiento del agua lluvia captada y a la salida de las barreras del sistema de potabilización), sin importar la temporada (de estiaje o lluvias) se mantienen dentro del límite permisible, por lo que se afirma que el agua después de ser tratada con el sistema es apta para el uso y consumo humano en términos de este parámetro.

En todas las barreras del sistema se observa un aumento considerable en los datos de conductividad eléctrica ya que los SDT y la conductividad eléctrica están estrechamente relacionadas. Cuanto mayor sea la cantidad de sales disueltas en el agua, mayor será el valor de la conductividad eléctrica (LENNTECH, 2018), podemos observar que esta relación se cumple en nuestro sistema, siendo la relación que se sugiere para este caso de estudio: la conductividad eléctrica será aproximadamente dos veces la concentración de SDT.

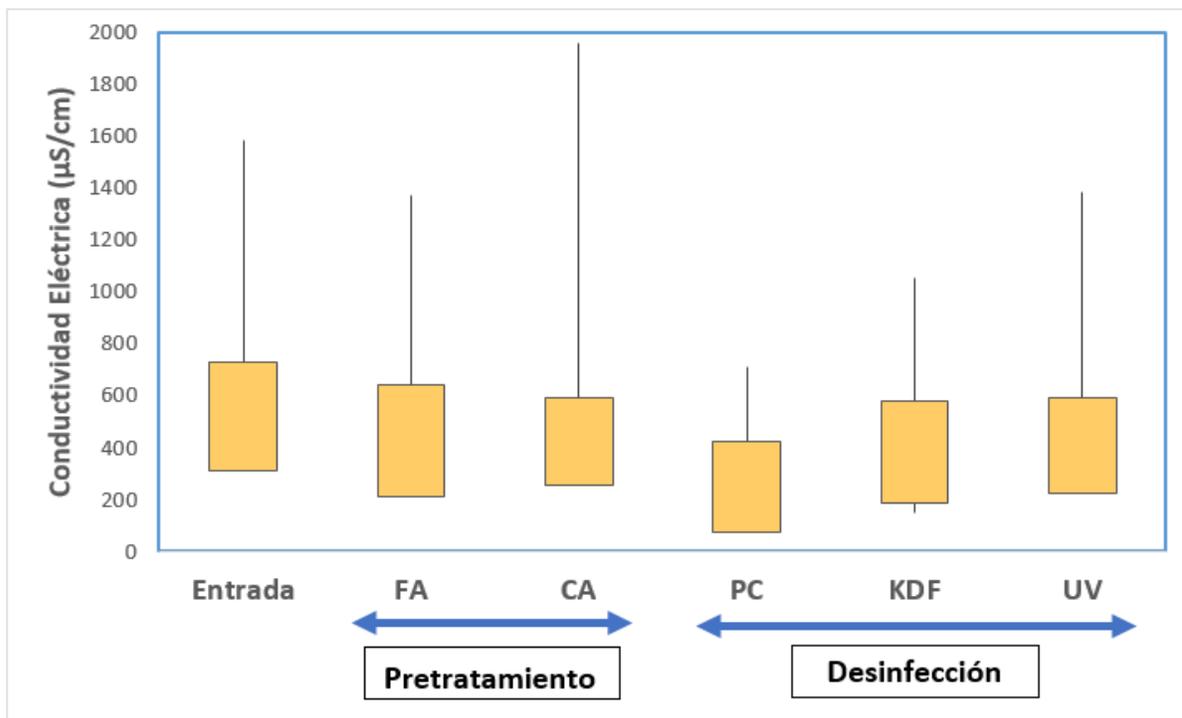


Figura 28. Comparación de Conductividad Eléctrica a la entrada del sistema de potabilización y salida en cada barrera.

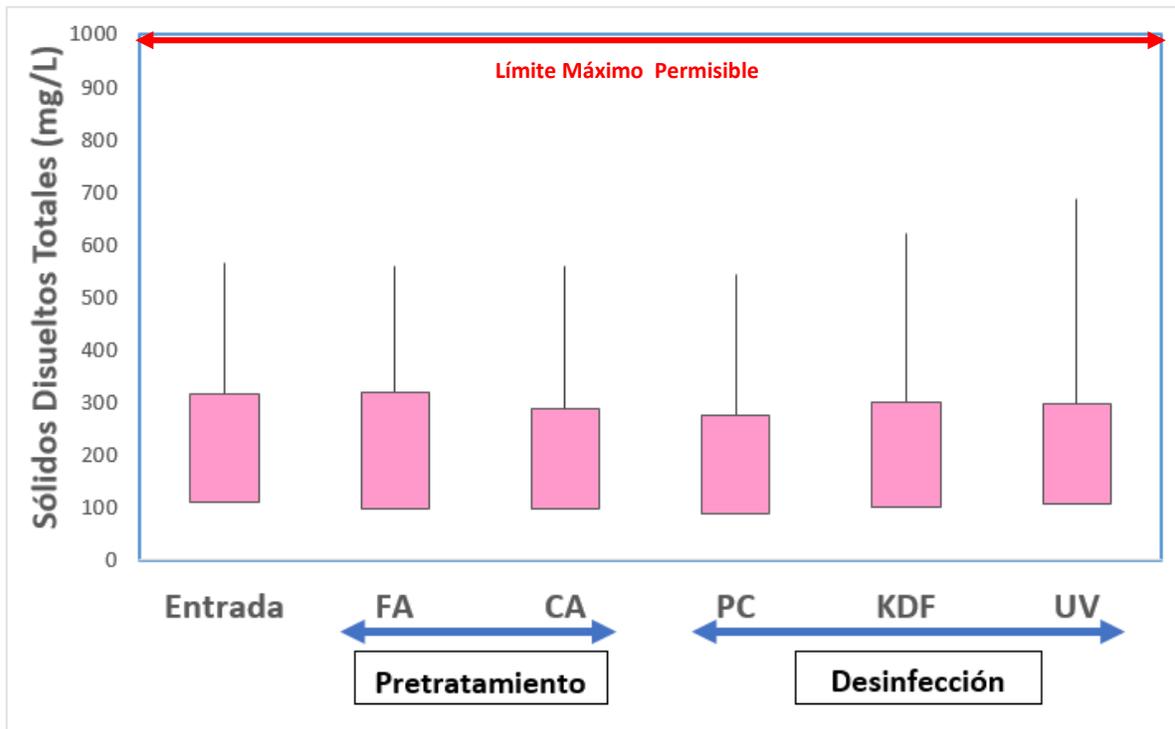


Figura 29. Comparación de Sólidos Disueltos Totales a la entrada del sistema de potabilización y salida en cada barrera.

Con respecto al parámetro de dureza total, con base en los resultados que a continuación son expuestos y su comparación con lo establecido en la modificación a la NOM-127-SSA1-1994, que establece el valor máximo permisible de 500 mg/L  $\text{CaCO}_3$ , se puede afirmar que los valores no salen de lo admisible en ninguna muestra, en todos los casos se encontraron por debajo de la concentración establecida (Figura 30). Es pertinente señalar que la concentración de cationes  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  en este estudio representan más del 90% y 10% respectivamente. En todas las muestras la dureza total es baja y es de vital importancia resaltar su control en el agua potable, ya que las aguas blandas y duras han sido relacionadas con problemas cardíacos y cálculos renales (Pérez-López, 2016), se recomienda hacer modificaciones a la técnica presentada por Calcinor (2017) para aumentar la dureza total en el agua resultante de las tres barreras de desinfección, empleando disoluciones patrón preparadas a partir de  $\text{CaO}$  o  $\text{Ca(OH)}_2$  grado reactivo, se sugiere alcanzar una concentración de 200 mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$  debido a que el sabor del agua es mayormente aceptado por el consumidor y al calentarla no formará depósitos de carbonato de calcio (OMS, 2017).

La radiación ultravioleta (UV) y el filtro de plata coloidal (PC) son las barreras que presentan concentraciones promedio más bajas, 31.5 mg CaCO<sub>3</sub>/L y 31.4 mg CaCO<sub>3</sub>/L respectivamente.

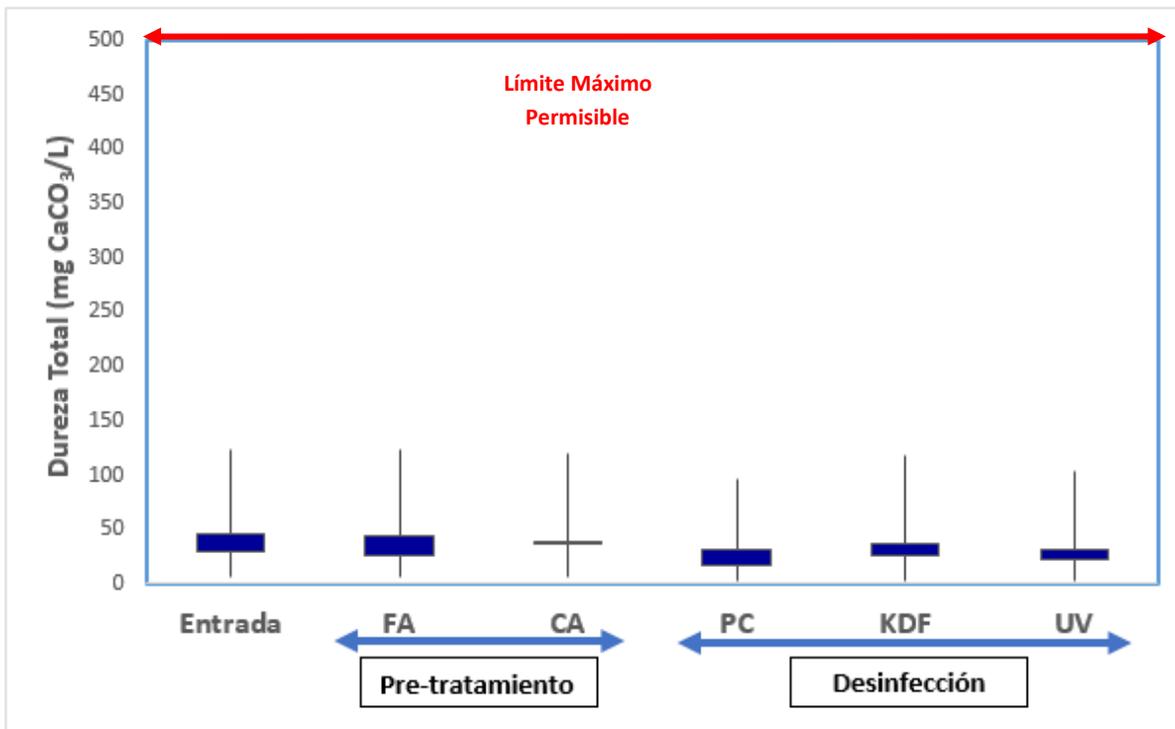


Figura 30. Comparación de Dureza Total a la entrada del sistema de potabilización y salida en cada barrera.

A pesar de que en muchas ciudades del mundo el pH del agua de lluvia se reporta como ácido (Torres, *et al.*, 2011), debido a que cuando los óxidos de azufre y nitrógeno (compuestos químicos generados por dos principales vías: antropogénicas, a partir de la quema de combustibles fósiles y fuentes naturales provenientes de las emisiones volcánicas y fuentes termales, entre otras), que intervienen en la química de la atmósfera y en su equilibrio, causando que disminuya por debajo de 5.6 unidades de pH (Pérez, *et al.*, 2012).

Por la ubicación de la AMC (en la carretera federal México-Cuernavaca) existen potenciales agentes contaminantes por fuentes antropogénicas, y los vientos dependiendo de su dirección pueden incidir en el arrastre de los contaminantes, los resultados presentados sugieren que ninguna fuente de contaminantes antes mencionados tienen influencia en el agua captada y mucho menos en el agua

resultante del sistema de potabilización tal y como se observa en la Figura 31.

En efecto, en la Figura 31 se observa una tendencia muy clara en la que el pH del agua muestreada en la superficie de la cisterna de almacenamiento como en el agua proveniente del efluente de cada barrera que compone el sistema de potabilización se encuentra dentro de los límites permisibles de la normatividad actual en México, cumpliéndola cabalmente, se asume que el comportamiento neutro es debido a que el agua es almacenada en un reservorio construido de cemento<sup>17</sup>.

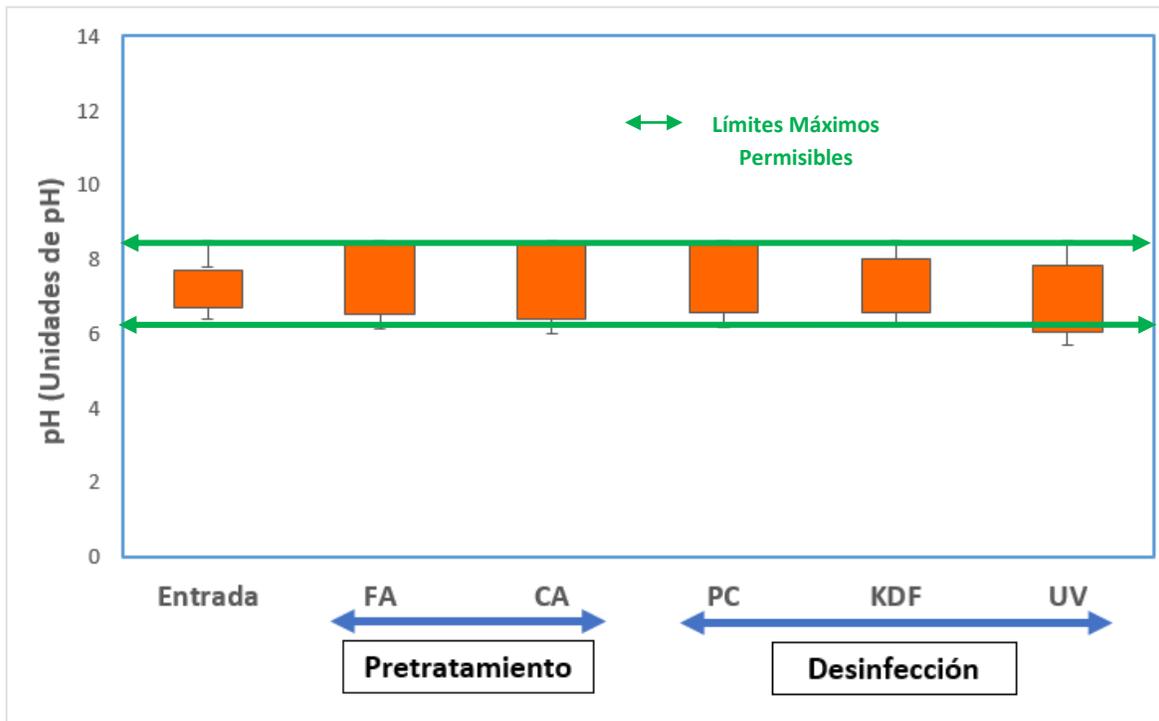


Figura 31. Comparación de pH a la entrada del sistema de potabilización y salida en cada barrera.

En lo que respecta al parámetro de turbiedad, los resultados son presentados en la Figura 32, ésta es ocasionada por partículas suspendidas o materia coloidal en el agua. Los resultados obtenidos muestran la existencia de amortiguamiento en el FA (presentando un valor máximo de 22.56 UTN y mínimo de 4.22 UTN en comparación con el valor máximo a la entrada del sistema de potabilización).

<sup>17</sup> Chiang, *et al.*, (2013) reportan que reservorios para almacenamiento del agua de lluvia captada construidos de cemento, debido a sus principales componentes (piedra caliza, arcilla y mineral de hierro) propician comportamiento neutro de pH y dependiendo del tiempo de almacenamiento pudiese llegar a presentar pH alcalino.

Se observa que el mejor desempeño en la remoción de turbiedad es el filtro PC con un 33.34% de eficiencia, seguido por la lámpara UV con una eficiencia del 32.56% y por último el filtro KDF con una eficiencia de 23.81% en la remoción de turbiedad. La baja eficiencia se atribuye a la formación de una película biológica de bacterias, algas u otros microorganismos en la superficie y al interior del lecho filtrante.

Este resultado, poco satisfactorio, no se correlacionó con la eficiencia de la acción desinfectante del PC o UV, reduciendo significativamente el valor de turbiedad ocasionando una desinfección adecuada en dichos filtros. La turbiedad es un parámetro que fluctua considerablemente, es importante su control y determinación, como se sabe elevados niveles de turbiedad pueden proteger a los microorganismos de los efectos de la desinfección, estimular la proliferación de bacterias y aumentar la demanda de desinfectante (Marcó, *et al.*, 2004).

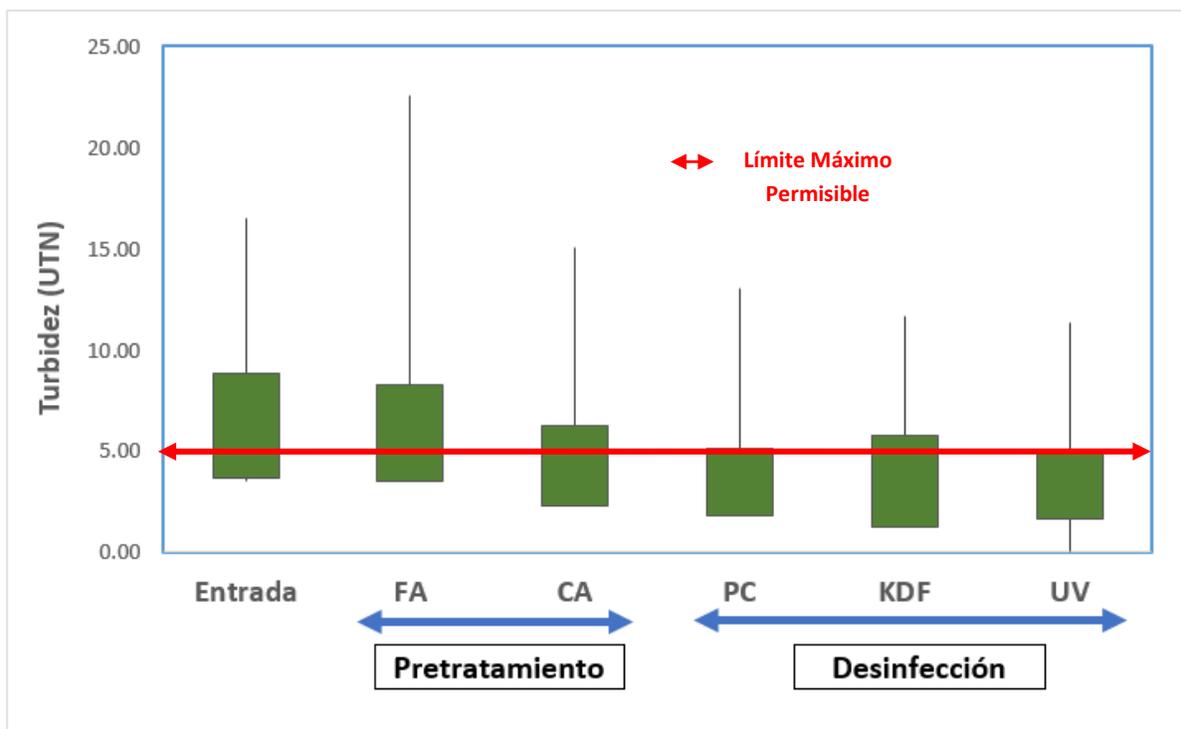
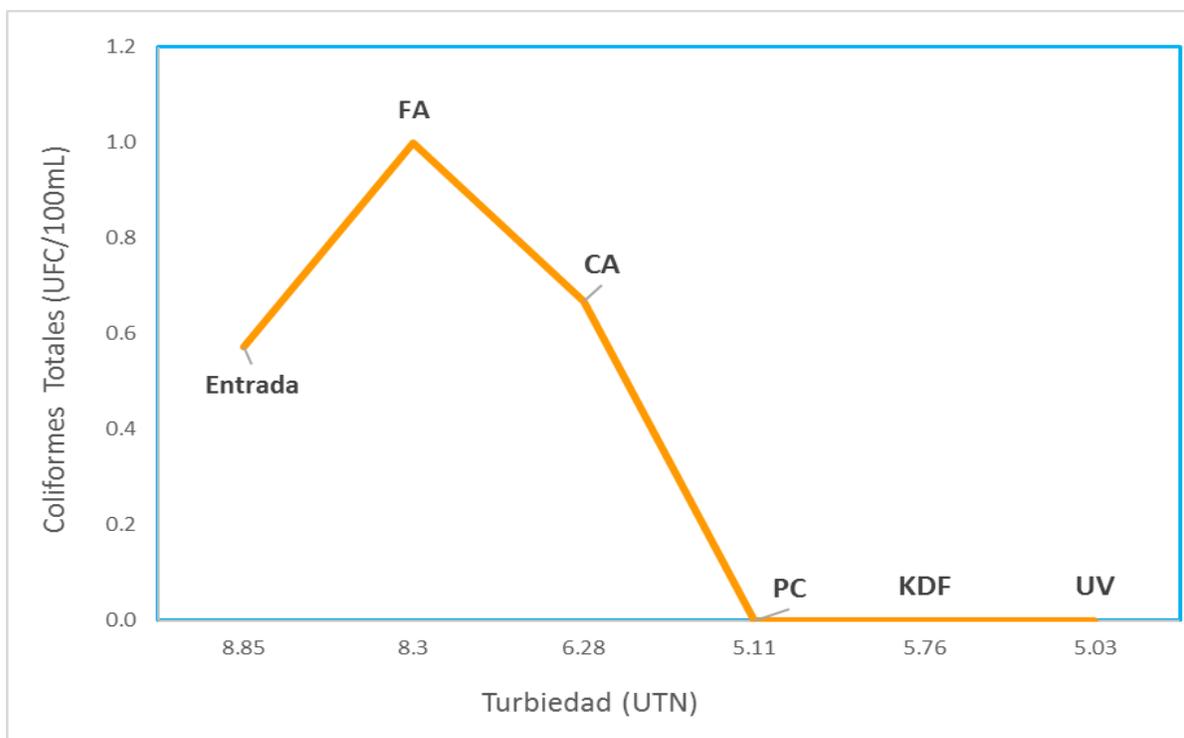


Figura 32. Comparación de Turbiedad a la entrada del sistema de potabilización y salida en cada barrera.

La Figura 33 muestra que no existe una correlación entre turbiedad coliformes totales que permite sugerir el uso de la turbiedad como indicador cualitativo indirecto de riesgo por contaminación microbiológica para el agua muestreada y potabilizada en este estudio porque existe ausencia de organismos coliformes a las salidas de

nuestras tres barreras de desinfección. Es importante mencionar que, para el caso de virus, cuya supervivencia no está necesariamente ligada a la presencia de coliformes, y tal vez la medición de turbiedad en el servirá para determinar indirectamente el riesgo de contaminación por gérmenes.



**Figura 33. Correlación de Turbiedad y coliformes totales a la entrada del sistema de potabilización y salida en cada barrera.**

### 7.1 Aplicación del análisis de varianza a los resultados

En la Tabla 9 se presenta el análisis de varianza efectuado a los parámetros que reporta Bello (2018) y sobrepasaron los LMP en la NOM-127-SSA1-1994 que fueron coliformes totales y turbiedad, así como para la absorbancia  $UV_{254}$ , para evidenciar la existencia de una diferencia significativa entre la calidad del agua de lluvia a la entrada y la salida en las etapas descritas en la Figura 18, encontrando que estadísticamente para el parámetro de turbiedad en todas las etapas del sistema de potabilización no existe diferencia significativa en la calidad del agua a la de entrada y a la salida de cada una de las barreras.

**Tabla 9. Recapitulación del estudio de varianza para ésta investigación.**

<b>Coliformes Totales</b>			
<b>Barrera</b>	<b>F<sub>calculada</sub></b>	<b>Probabilidad</b>	<b>Resultado</b>
Pretratamiento (FA+CA)	0	1	Se rechaza
PC	2.4	0.15	Se rechaza
KDF	2.4	0.15	Se rechaza
UV	2.4	0.15	Se rechaza
<b>Turbiedad</b>			
Pretratamiento (FA+CA)	26.98	$5.76 \times 10^{-7}$	No se rechaza
PC	13.92	0.00026	No se rechaza
KDF	3.5	0.06	No se rechaza
UV	16.13	$6.93 \times 10^{-5}$	No se rechaza
<b>Absorbancia UV<sub>254</sub></b>			
Pretratamiento (FA+CA)	2.48	0.064	Se rechaza
PC	0.81	0.37	Se rechaza
KDF	0.69	0.41	Se rechaza
UV	0.31	0.58	Se rechaza
F <sub>tablas</sub> = 2.77 ( $\alpha = 0.05$ , 1, 172, 1 cola, derecha)			

Para los parámetros coliformes totales y absorbancia UV existen diferencias significativas entre la calidad del agua de lluvia a la entrada y a la salida en cada una de las barreras y se asume que son eficientes en la remoción de dichos parámetros.

## 7.2 Balance de masa

El balance de masa global aplicado al sistema de potabilización se muestran en la Tabla 10, los cuales se presentan como gramos de contaminantes retenidos por cada barrera. Los valores con signo negativo significan que el efluente resultante de la barrera tuvo un incremento en la concentración del parámetro correspondiente con respecto a su alimentación, mientras que los valores positivos significan los gramos retenidos por la barrera con respecto a su alimentación.

**Tabla 10. Recapitulación de gramos de contaminantes retenidos por cada barrera, obtenidos del balance de masa a 87 días de operación del sistema de potabilización. (Porcentaje de remoción).**

PARÁMETRO	ALIMENTACIÓN (g)	FA	CA	PC	KDF	UV
<b>Alcalinidad Total</b>	16.80	2.90 <b>(17.25)</b>	1.60 <b>(9.52)</b>	0.04 <b>(0.23)</b>	0.04 <b>(0.23)</b>	0.74 <b>(4.40)</b>
<b>Carbono Orgánico Total</b>	1.76	-0.06	0.73 <b>(41.5)</b>	-0.44	-0.051	-0.024
<b>Demanda Química de Oxígeno</b>	2.62	1.52 <b>(58)</b>	0.74 <b>(28.25)</b>	0.09 <b>(3.44)</b>	-0.067	0.1 <b>(3.81)</b>
<b>Dureza al Calcio</b>	5.57	-1.20	2.84 <b>(50.98)</b>	1.31 <b>(23.52)</b>	0.33 <b>(5.92)</b>	1.16 <b>(20.83)</b>
<b>Dureza Total</b>	31.74	1.65 <b>(5.2)</b>	2.98 <b>(9.39)</b>	5.43 <b>(17.10)</b>	0.46 <b>(1.45)</b>	3.81 <b>(12)</b>
<b>SDT</b>	220.03	-2.17	21.16 <b>(9.62)</b>	2.91 <b>(1.32)</b>	-2.909	-2.088

Con base en lo observado en la Tabla 10 se puede afirmar que la barrera con mejor desempeño a lo largo de 87 días de operación en la etapa de pretratamiento fue filtro CA removiendo el 9.52% de alcalinidad total, 41.5% de COT, 28.25% de DQO, 50.98% de dureza debida al ión calcio, 9.39% de dureza total y 9.62% de SDT. El filtro FA fue eficiente en la disminución en la concentración de alcalinidad total (17.25%), DQO (58%) y dureza total (5.2%), se piensa que los incrementos en los parámetros como dureza al calcio y SDT fueron ocasionados por una disminución

en la capacidad de adsorción del lecho filtrante con el paso de las jornadas laborales de acuerdo con lo reportado por Zani, *et al.*, 2005.

El filtro PC fue capaz de remover el 0.23% de alcalinidad total, 3.44% de DQO, 23.52% de dureza al calcio, 17.10% de dureza total y el 1.32% de SDT.

El filtro KDF fue eficiente en la remoción del 0.23% de alcalinidad total, 4.04% de dureza al calcio y 5.92% de dureza total; mientras que la luz UV<sub>254</sub> fue eficiente en la remoción del 4.40% de alcalinidad total, 3.81% de DQO, 20.83% de dureza al calcio y 12% de dureza total. Los incrementos en las concentraciones de SDT tanto en el filtro KDF como en la luz UV<sub>254</sub> se piensa que fue debido a que los filtros no son eficientes en la remoción de material disuelto, debido a que el tamaño de las partículas es inferior al tamaño de su poro.

## 8. CONCLUSIONES

- El pretratamiento conformado por un filtro de arena (FA) y un filtro de carbón activado (CA) fue capaz de amortiguar la variabilidad de color verdadero y turbiedad que el agua de lluvia presenta a lo largo de la temporada y de esta manera se reduce la protección de los microorganismos aglomerados o absorbidos en las partículas afecten el proceso de desinfección.
- Durante la desinfección, el filtro PC removió el 94% para absorbancia UV<sub>254</sub>, 35.43% para color verdadero, 12.58% para SDT y 14.29% para turbiedad. Mientras que con el filtro KDF tuvo una eficiencia en la remoción del 92.3%, 12.99%, 4.69% y 3.25% respectivamente, finalmente, en el filtro UV logra una eficiencia en la remoción del 95%, 34.476%, 7.10% y 11.81% para los mismos parámetros por lo que la selectividad para remover dichos parámetros fue de la siguiente manera: filtro PC  $\geq$  UV > KDF.
- El análisis estadístico determina que para los parámetros absorbancia UV<sub>254</sub> y los coliformes totales los valores resultantes no representan diferencias significativa entre las barreras, mientras que para la turbiedad si la hay, lo cual indica que este último parámetro es reelevante para evaluar el desempeño del sistema.
- El balance de masa aplicado a las propiedades intesivas del agua de lluvia potabilizada establece que el filtro CA retiene en mayor grado el parámetro de alcalinidad total, dureza al ión calcio, dureza total y SDT, mientras que en la barrera de desinfección el filtro PC fue capaz de remover la mayor carga de contaminates, seguido del filtro UV y por último el filtro KDF. Por lo tanto la propuesta del sistema de potabilización debe basarse en un pretratamiento con CA seguido de una etapa de desinfección a base de un filtro PC o UV.
- El agua lluvia captada y almacenada en el auditorio “Galileo Galilei” de la AMC representa una alternativa viable como agua para consumo humano si y solo sí se cuente con un método potabilización.

## 9. REFERENCIAS

1. Abbasi, T., & Abbasi, A. (2011). Sources of pollution in rooftop rainwater harvesting systems and their control. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* (47), 2097-2167.
2. Abdulla, F., & Al-Shareef, A. (2009). Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan. *Desalination*, 6 (243), 195-207.
3. Aguamarket. (2017). *Aguamarket*. Recuperado el 11 de Abril de 2018, de <http://www.aguamarket.com/productos/productos.asp?producto=4661>
4. Águila-Arreola, C. (30 de Mayo de 2017). Falta de agua, efecto principal del cambio climático: Semarnat. *La Jornada*, pág. 36.
5. Anaya-Garduño, M. (2009). Antecedentes del agua de lluvia. Ciudad de México, México: CIDECALLI-CP.
6. APHA. (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington, DC: APHA.
7. Barba, H. (2002). *Conceptos básicos de la contaminación del agua y parámetros de medición*. Santiago de Calí, Colombia: Universidad del Valle.
8. Bello, N. (2018). *Variabilidad de la calidad del agua de lluvia en los sistemas de almacenamiento y su potencial como fuente para abastecimiento, (tesis de licenciatura)*. Ciudad de México, México: UNAM.
9. Buelta, A., & Martínez, R. (2014). *Guía básica de control de calidad de agua*. Madrid, España: ONGAWA.
10. Campisano, A., Butler, D., Ward, S., Friedler, E., & DeBusk, K. (2017). Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives. *Water Research*(115), 195-209.
11. Carbotecnia. (17 de Julio de 2014). *Carbotecnia*. Obtenido de <https://www.carbotecnia.info/encyclopedia/carbon-activado-bacteriostatico/>
12. CEMDA. (2006). *El agua en México: lo que todas y todos debmos saber* (Primera ed.). Ciudad de México, México: FEA.
13. Chávez, A., & Mautner, M. (2016). *Potencial de aprovechamiento de captación de agua de lluvia (SCALL) en México*. Ciudad de México, México: Instituto de Ingeniería, UNAM.

14. Chiang, V., Kao, M., & Liu, C. (2013). Assessment of rainwater harvesting systems at a university in Taipei. *Water Science & Technology*, 2, 564-571.
15. CONAGUA. (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Ciudad de México, México: SEMARNAT.
16. CONAGUA. (2009). *Semblaza histórica del agua en México*. Ciudad de México, México: SEMARNAT.
17. CONAGUA. (2014). *Situación del subsector agua potable, drenaje y saneamiento*. Ciudad de México, México: SEMARNAT.
18. CONAGUA. (2015). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas Potabilizadoras de Tecnología Simplificada*. Ciudad de México, México: SEMARNAT.
19. CONAGUA. (2015). *Situación del subsector agua potable, drenaje y saneamiento*. Ciudad de México, México: SEMARNAT.
20. CONAGUA. (2016). *Situación del subsector agua potable, drenaje y saneamiento*. Ciudad de México, México: SEMARNAT.
21. CONAGUA. (2016). *Taller sobre el Programa Nacional para Captación de Agua de Lluvia y Ecotecnias en Zonas Rurales (PROCAPTAR)*. Ciudad de México, México: SEMARNAT.
22. CONAGUA. (2017). *Estadísticas del agua en México*. Ciudad de México, México: SEMARNAT.
23. CONAGUA. (2017). *Situación del subsector agua potable, drenaje y saneamiento*. Ciudad de México, México: SEMARNAT.
24. Confidence, T. W. (26 de Marzo de 2018). *Trojan Technologies*. Obtenido de <http://www.trojanuv.com/es/uv-basics>
25. Costa, H., Regina, M., & Anco, P. (2014). Calidad de las aguas meteóricas en la ciudad de Itajubá, Minas Gerais, Brasil. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 9(2), 336-346.
26. Cruz, Y., & Natalia, M. (2015). *Evaluación de alcalinizantes en el proceso de ajuste del pH para el agua tratada del río Cauca*. Santiago de Cali, Colombia: Universidad del Valle.
27. de la Peña, M., Ducci, J., & Zamora, V. (2003). *Tratamiento de agua residuales en México*. Ciudad de México, México: Banco Interamericano de Desarrollo.

28. Dozier, M., & McFarland, M. (2009). *Estandáres del agua potable*. Texas, Estados Unidos: Extensión Cooperativa de Texas, El Sistema Universitario Texas A&M.
29. Durand-Alegría, J., Gallego, A., García, A., & Pradana, J. (2005). *Aguas potables para consumo humano* (Primera ed.). Madrid, España: Universidad Nacional de Educación a Distancia.
30. Real Academia Española (2017). Recuperado el 19 de Julio de 2018, de <http://dle.rae.es/?id=3xzavas>
31. Espino-Valdés, M., Villalba, M., Mungía, A., & de la Garza-Aguilar, R. (2016). Importancia de la Norma Oficial Mexicana para la Calidad del Agua de Consumo. Una Visión Crítica. *Revista de Negocios & PyMES*, 2(4), 29-35.
32. Evans, C., Coombes, P., & Dunstan, R. (2006). Wind, rain and bacteria: The effect of weather on the microbial composition of roof-harvested rainwater. *Water Research*(40), 37-44.
33. FAO. (2013). *Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para agricultura y la seguridad alimentaria*. Roma, Italia: FAO.
34. Farreny, R., Morales-Pinzón, T., Guisasola, A., Tayá, C., Rieradevall, J., & Gabarrell, X. (2011). Roof selection for rainwater harvesting: Quantity and quality assessments in Spain. *Water Research*(45), 3245-3254.
35. FCEA. (2017). *AGUA.org.mx*. Recuperado el 7 de Mayo de 2018, de <https://agua.org.mx/cuanta-agua-tiene-mexico/>
36. Fletcher, T. D., Deletic, A., Mitchell, V., & Hatt, B. (2008). Reuse of urban runoff in Australia: A review of recent advances and remaining challenges. *Journal of Environmental Quality*, 116-127.
37. Font-Ribera, L., Esplugues, A., Ballester, F., Martínez-Arguelles, B., & Tardón, A. (2010). Trihalometanos en el agua de piscinas en cuatro zonas de España participantes en el proyecto INMA. *Gaceta Sanitaria*, 6(24), 483-486.
38. Fuentes, M., Ortíz, J., & Arias, L. (2018). Roof rainwater harvesting in Central Mexico: uses, benefits, and factors of adoption. *Water Journal*, 116(10), 1-15.
39. García, B. (2013). *Caracterización del agua de lluvia captada en una edificación para su aprovechamiento con fines de sustentabilidad hídrica*. Ciudad México, México: UNAM.

40. Gleason, A. (2005). *Manual de aprovechamiento de aguas pluviales en centros urbanos* (Primera ed.). Guadalajara, México: Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño.
41. Gómez, S., Páez, L., & Flores-Díaz, A. (2013). *Comportamiento de los sólidos en suspensión y sedimentales en cuerpos de agua: búsqueda de métodos aplicables al monitoreo aplicado*. Morelia, Michoacán: III Congreso nacional de manejo de cuencas hidrográficas.
42. Gould, J. (1999). *Is rainwater safe to drink? A review of recent findings in 9th International Rainwater Catchment Systems Conference "Rainwater Catchment: An Answer to the Water Scarcity of the Next Millennium"*. Petrolina, Brasil: International Rainwater Catchment Systems Association.
43. Gwenzi, W., Dunjana, N., Pisa, C., Tauro, T., & Nyamadzawo, G. (2015). Water quality and public health risks associated with roof rainwater harvesting systems for potable supply: Review and perspectives. *Sustainability of water quality and Ecology*(6), 107-118.
44. HACH. (2003). *Manual de análisis de agua*. Loveland, Colorado, EE.UU.: HACH COMPANY.
45. HACH. (2015). *Importancia de la medición de carbono orgánico total*. Recuperado el 18 de Abril de 2018, de <https://es.hach.com/asset-get.download.jsa?id=50613973176>
46. HACH. (2016). *Absorción UV para la monitorización de sustancias orgánicas en el agua potable*. Loveland, Colorado: HACH Company.
47. Helmreich, B., & Horn, H. (2009). Opportunities in rainwater harvesting. *Desalination*(246), 188-124.
48. Helmreich, B., & Horn, H. (2009). Opportunities in rainwater harvesting. *Elsevier B.V.*(248), 118-124.
49. Hernández, D. (2016). *Metales pesados en el agua de lluvia*. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
50. IAGUA. (2017). *IAGUA*. Recuperado el 7 de Mayo de 2018, de <https://www.iagua.es/blogs/aguaorgmx/recoleccion-agua-lluvia-como-alternativa-abasto-ciudad-mexico>

51. Ibne-Bashar, M., Karim, R., & Alam, M. (2018). Reliability and economic analysis of urban rainwater harvesting: A comparative study within six major cities of Bangladesh. *Resources, Conservation & Recycling*(133), 146-154.
52. IG, & SEDESOL. (2011). *Atlas de Peligros Naturales o Riesgos de la Delegación Tlalpan, Distrito Federal 2011*. Ciudad de México, México: UNAM.
53. Impluvium. (1 de Abril de 2014). Sistemas de captación de agua de lluvia. *Impluvium. Periódico digital de divulgación de la Red del Agua UNAM*, págs. 1-39.
54. INEGI. (2005). *Prontuario de información geográfica delegacional de los Estados Unidos Mexicanos*. Ciudad de México, México: INEGI.
55. INEGI. (2010). *Cuéntame*. Recuperado el 2 de Mayo de 2018, de <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/territorio/clima.aspx?tema=me&e=09>
56. INEGI. (2016). *Encuesta Nacional de los Hogares 2015*. Aguascalientes, México: INEGI.
57. INEGI. (2016). *Estadísticas a propósito del día del agua (22 de marzo)*. Aguascalientes, México: INEGI .
58. INEGI. (2017). *Cuéntame... información por entidad*. Recuperado el 15 de Junio de 2018, de <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/territorio/clima.aspx?tema=me&e=09>
59. Isla-Urbana. (2015). *Captación de agua de lluvia. Fuente de abastecimiento de agua sustentable en México*. Ciudad de México, México: Isla Urbana.
60. Jiménez, B., Torregrosa, M., & Aboites, L. (2010). *Agua en México: Cauces y Encauces* (Primera ed.). Ciudad de México, México: Academia Mexicana de Ciencias.
61. Leal, M. (2005). Tecnologías convencionales de tratamiento de agua y sus limitaciones. *Tecnologías solares para la desinfección y descontaminación del agua*, 57-66.
62. Lee, M., Kim, M., & Han, M. (2017). Consideration of rainwater quality parameters for drinking purposes: A case study in rural Vietnam. *Journal of Environmental Management* (2000), 400-406.

63. LENNTECH. (2017). *FAQ del ablandamiento del agua. Preguntas y respuestas frecuentes*. Recuperado el 18 de Abril de 2018, de <https://www.lennotech.es/procesos/ablandamiento/preguntas-mas-frecuentes/faq-ablandamiento-agua.htm>
64. LENNTECH. (2017). *LENNTECH. WATER TREATMENT SOLUTIONS*. Recuperado el 11 de Abril de 2018, de <https://www.lennotech.es/filtros-y-filtracion/medio-filtrante-kdf.htm>
65. LENNTECH. (2018). *LENNTECH, WATER TREATMENT SOLUTIONS*. Recuperado el 15 de Junio de 2018, de <https://www.lennotech.es/calculadoras/tds/tdsyconductividad-electrica.htm>
66. Marcó, L., Azario, R., & Metzler, C. (2004). La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 4, 72-82.
67. Meera, V., & Mansoor-Ahmed, M. (2006). Water quality of rooftop rainwater harvesting systems: a review. *Journal of Water Supply: Research and Technology* 55), 257-268.
68. Mejía-Clara, M. (2005). *Análisis de la calidad del agua para consumo humano y percepción local de las tecnologías apropiadas para su desinfección a escala domiciliaria, en la microcuenca El Limón, San Jerónimo, Honduras*. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
69. Melidis, P., Akrotos, S., Tsihrintzis, A., & Trikilidou, E. (2006). Characterization of rain and roof drainage water quality in Xanthi, Greece. *Environmental Monitoring and Assessment*, 15-27.
70. Méndez, B., Klenzendorf, B., Afshar, R., Simmons, T., & Barrett, E. (2011). The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater. *Water Reserch*, 2049-2059.
71. Méndez, O. (2016). *Aqualia*. Recuperado el 23 de Abril de 2018, de <https://www.iagua.es/blogs/oscar-mendez/al-mal-tiempobuena-es-agua-lluvia>
72. Mendoza, L. H. (2004). Métodos para purificar agua. *Revista del consumidor*, 40-43.

73. Miao-Ching, C., & Chen-Feng, Y. (2010). Sources of major ions and heavy metals in rainwater associated with typhoon events in southwestern Taiwan. *Journal of Geochemical Exploration* (105), 106-116.
74. Monroy, O. (2017). Manejo sustentable de recursos para la Ciudad de México desde una visión de cuenca. Ponencia presentada en el marco del Foro de Trabajo: Consensos para la construcción de la nueva ley de aguas y la Contraloría Ciudadana para la Ciudad de México. Ciudad de México, México: Universidad Autónoma Metropolitana.
75. Mwenge-Kahinda, J., & Taigbenu, A. (2011). Rainwater harvesting in South Africa: Challenges and opportunities. *Physics and Chemistry of the Earth*(36), 968-976.
76. Mwenge-Kahinda, J., Taigbenu, A., & Boroto, J. (2007). Domestic rainwater harvesting to improve water supply in rural South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*(32), 1050-1057.
77. NCPH. (2009). *Hoja informativa sobre las bacterias coliformes en los pozos de agua privada*. Carolina del Norte, Estados Unidos: NCPH.
78. Nicholson, N., Clark, S., Long, B., Spicher, J., & Steele, K. (2009). Rainwater harvesting for Non-Potable use in gardens: A comparasion of runoff water quiality from green vs. tradicional roffs . *Proceedings of world environmental and water*, 1478-1485.
79. OMS, & ONU. (2008). *El derecho al agua*. Ginebra, Suiza: ONU Habitat.
80. UNESCO. (2016). *Informe de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016. Agua y empleo*. París, Francia: UNESCO.
81. ONU. (2016). *Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Nueva York, Estados Unidos: CEPAL.
82. OPS. (2004). *Guía de diseño para captación del agua de lluvia*. Lima, Peru: COSUDE.
83. Orellana, J. (2005). *Tratamiento de las aguas*. Santa Fe, Argentina: Universidad Tcnologica Nacional.
84. Ospina-Zuñiga, O., & Ramírez-Arcila, H. (2014). Evaluación de la calidad del agua de lluvia para su aprovechamiento y uso doméstico en Ibagué, Tolima, Colombia. *Ingeniería Solidaria*, 10 (17), 125-138.

85. Pacheco, M. (2008). Avances en la gestión integral del agua de lluvia. Contribuciones al consumo sostenible del agua, el caso de "Lluviatl" en México. *Revista internacional de sostenibilidad, tecnología y humanismo* (8), 39-57.
86. Pérez, A., Díaz, J., & González, G. (2014). Estudio comparativo de dos sistemas de filtración casera para el tratamiento de agua para consumo humano. *Ingenium*, 8(22), 11-20.
87. Pérez, F., Gassmann, M., Righetti, S., & Covi, M. (2012). *Análisis físicoquímico del agua de lluvia en Buenos Aires y condiciones meteorológicas asociadas*. Mendoza, Argentina: Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
88. Pérez-López, E. (2016). Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica. *Tecnología en marcha*, 29(3), 3-14.
89. RAIN-foundation. (2008). *RAIN Water Quality Guidelines*. Amsterdam, Holanda: RAIN foundation.
90. Ramos, R., Sepúlveda, R., & Villalobos, F. (2003). *El agua en el medio ambiente: muestreo y análisis*. (Primera ed.). Mexicali, Baja California: Plaza y Valdés S.A. de C.V.
91. Rodríguez, T., Botelho, D., & Cleto, E. (2008). Tratamiento de efluentes industriales de naturaleza recalcitrante usando ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta. *Fac. Ing. Univ. Antioquia* (46), 24-38.
92. Romero, S. (2017). *Implementación de una planta piloto para la potabilización del agua de lluvia, (tesina de especialidad)*. Ciudad de México, México: UNAM.
93. SACMEX. (2012). *Programa de gestión integral de los recursos hídricos, visión 20 años*. Ciudad de México, México: SACMEX.
94. Sámano, G. (2017). *Diseño de un sistema de captación de agua de lluvia en la Academia Mexicana de Ciencias, (tesina de especialidad)*. Ciudad de México, México: UNAM.
95. Satué, N., & Díaz, R. (2000). Determinación de la absorbancia UV en aguas potables de la provincia de Huesca. *Revista Tecnología del Agua*(34), 1-5.
96. Scanlon, J., Cassar, A., & Nemes, N. (2004). *Water as a human right?* Ginebra, Suiza: IUCN.
97. SEMARNAT. (2004). *Estadísticas del agua en México*. Ciudad de México, México: SEMARNAT.

98. SEMARNAT. (2016). *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. Indicadores clave, de desempeño ambiental y crecimiento verde.* . Ciudad de México, México: SNIARN.
99. Shelton, T. (1989). *Interpreting Drinking Water Quality Analysis, What Do the Numbers Mean?* New Brunswick, NJ: Cook College-Rutgers University.
100. Suaste, J., & Morelos, M. (2018). Que llueva, que llueva... Captación de agua de lluvia. TV Agua.
101. Torres, A., Méndez, S., & López, L. (2011). Preliminary Assessment of roof runoff rainwater quality for potencial harvesting in Bogota's peri-urban areas. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 14(1).
102. Trejo, E., & Alvarez, M. (2007). *Compendio de normas internacionales: derecho al agua.* Ciudad de México, México: Centro de documentación, información y análisis, Cámara de Diputados.
103. TWDB. (2005). *The Texas Manual On Rainwater Harvesting.* Austin, Texas: Texas Water Development Board.
104. UN, & WBG. (2018). *Making every drop count. An agenda water action.* Washington, D.C., U.S.: WBG.
105. UNESCO, & PHI. (2015). *Iniciativa internacional sobre la calidad del agua.* París, Francia: UNESCO.
106. UNGA. (2010). 64/292. *El derecho humano al agua y el saneamiento.* Ginebra, Suiza: IUNC.
107. Valdivieso, C., Valdivieso, R., & Valdivieso, O. (2011). Determinación del tamaño muestral mediante el uso de árboles de decisión . *UPB - Investigación y Desarrollo*, 148-176.
108. Vernaza, R. (1999). *Filtración en múltiples etapas. Tecnología innovativa para el tratamiento de agua* (Primera ed.). Cali, Colombia: Universidad del Valle.
109. WHO. (2003). *Domestic Water Quantity, Service Level and Health.* Ginebra, Suiza: WHO.
110. WHO. (2003). *Total dissolved solids in Drinking-water.* Ginebra, Suiza: The World Health Organization.
111. WHO. (2008). *Guidelines for Drinking-water quality. Recommendations.* Ginebra, Suiza.: World Health Organization.

112. WHO. (2011). *Guidelines for drinking water quality*. Ginebra, Suiza: World Health Organization .
113. WHO. (2017). *Guidelines for drinking water quality*. Ginebra, Suiza: World Health Organization.
114. WHO. (2017). *Guidelines for Drinking-water quality. Recommendations*. Ginebra, Suiza: World Health Organization .
115. Young, L. J., Gippeum, B., & Mooyoung, H. (2012). Quality of roof-harvested rainwater. Comparison of different roofing materials. *Environmental Pollution* , 422-429.
116. Zani, C., Feretti, D., Buschini, A., Poli, P., Rosi, C., & Di Caterino, R. (2005). Toxicity and genotoxicity of surface water before and after various potabilization steps. *Mutation Research*(587), 26-37.

# Anexo 1. Análisis estadístico

La prueba se basó en una comparación de dos estimados independientes de la varianza poblacional común  $\sigma^2$ . Dichos estimadores se obtuvieron haciendo la partición de la variabilidad total de nuestros datos, denotados mediante la sumatoria doble en dos componentes.

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 \quad (\text{Ec. 7})$$

Identidad de la suma de cuadrados:

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = n \sum_{i=1}^k (\bar{y}_i - \bar{y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (\text{Ec. 8})$$

Fue conveniente identificar los términos de la identidad de la suma de cuadrados con la siguiente notación:

$$STC = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = \textit{Suma total de los cuadrados} \quad (\text{Ec. 9})$$

$$SCT = n \sum_{i=1}^k (\bar{y}_i - \bar{y}_{..})^2 = \textit{Suma de los cuadrados del tratamiento} \quad (\text{Ec. 10})$$

$$SCE = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 = \textit{Suma de los cuadrados del error} \quad (\text{Ec. 11})$$

Entonces, la identidad de la suma de los cuadrados se puede representar simbólicamente con la ecuación 6.

$$STC = SCT + SCE \quad (\text{Ec.12})$$

La identidad anterior expresa cómo las variaciones entre los tratamientos y dentro de los tratamientos contribuyen a la suma total de cuadrados. Eventualmente se calculó estimados de la varianza que determinan la razón que:

$$E(\text{SCT}) = (k - 1)\sigma^2 + n \sum_{i=1}^k \alpha_i^2 \quad (\text{Ec. 13})$$

Si  $H_0$  es verdadera, un estimado de  $\sigma^2$  basado en  $k-1$  grados de libertad es dado por la ecuación 8:

$$s_1^2 = \frac{\text{SCT}}{k-1} \quad (\text{Ec. 14})$$

Si  $H_0$  es verdadera y por ello cada  $\alpha_i$  en la ecuación 7 es igual a cero, se observa que:

$$E\left(\frac{\text{SCT}}{k-1}\right) = \sigma^2 \quad (\text{Ec. 15})$$

y  $s_1^2$  es un estimado no sesgado de  $\sigma^2$ . Sin embargo, si  $H_1$  es verdadera, se tiene que

$$E\left(\frac{\text{SCT}}{k-1}\right) = \sigma^2 + \frac{n}{k-1} \sum_{i=1}^k \alpha_i^2 \quad (\text{Ec. 16})$$

y  $s_1^2$  estima a  $\sigma^2$  más un término adicional, que mide la variación debida a los efectos sistemáticos. Otro estimado independiente de  $\sigma^2$ , basado en  $k(n-1)$  grados de libertad, es la ecuación 11:

$$s^2 = \frac{\text{SCE}}{k(n-1)} \quad (\text{Ec. 17})$$

Cuando  $H_0$  es verdadera, la razón  $f = \frac{s_1^2}{s^2}$  es un valor de la variable aleatoria F, que tiene la distribución F con  $k-1$  y  $k(n-1)$  grados de libertad (véase ecuación 13). Como  $s_1^2$  sobrestima a  $\sigma^2$  cuando  $H_0$  es falsa, se tiene una prueba de una cola con la región crítica localizada por completo en la cola derecha de la distribución. A un nivel de significancia de  $\alpha$  se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) cuando:

$$f > f_{\alpha}[k-1, k(n-1)] \quad (\text{Ec. 18})$$

$$F = \frac{\sigma_2^2 s_1^2}{\sigma_1^2 s_2^2} \quad (\text{Ec. 19})$$

## Anexo 1.1 Resultados obtenido en el análisis de varianza (ANOVA)

**Tabla 3. Análisis de varianza de coliformes totales en el pretratamiento.**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0	1	0	0	1	4.75
Dentro de los grupos	11.43	12	0.95			
Total	11.43	13				

**Tabla 4. Análisis de varianza de coliformes totales en el filtro PC.**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1.14	1	1.14	2.4	0.15	4.75
Dentro de los grupos	5.71	12	0.48			
Total	6.86	13				

**Tabla 5. Análisis de varianza de coliformes totales en el filtro KDF.**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1.14	1	1.14	2.4	0.15	4.75
Dentro de los grupos	5.71	12	0.48			
Total	6.86	13				

**Tabla 6. Análisis de varianza de turbiedad en el pretratamiento.**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	252.04	1	252.04	26.98	5.76E-07	3.90
Dentro de los grupos	1606.82	172	9.34			
Total	1858.86	173				

**Tabla 7. Análisis de varianza de turbiedad en el filtro PC.**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	59.22	1	59.22	13.92	0.0003	3.90
Dentro de los grupos	731.77	172	4.25			
Total	790.99	173				

**Tabla 8. Análisis de varianza de turbiedad en el filtro KDF.**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	11.86	1	11.85	3.50	0.06	3.90
Dentro de los grupos	582.85	172	3.40			
Total	594.71	173				

**Tabla 9. Análisis de varianza de turbiedad en el filtro UV.**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	63.32	1	63.32	16.63	6.9X10 <sup>-05</sup>	3.90
Dentro de los grupos	654.85	172	3.81			
Total	718.17	173				

**Tabla 10. Análisis de varianza de la absorbancia UV<sub>254</sub> en el pretratamiento.**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	36996.17	1	36996.17	3.48	0.064	3.90
Dentro de los grupos	1828463.96	172	10630.60			
Total	1865460.124	173				

**Tabla 11. Análisis de varianza de absorbancia UV<sub>254</sub> en el filtro PC.**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	7197.23	1	7197.23	0.81	0.37	3.90
Dentro de los grupos	1528339.72	172	8885.70			
Total	1535536.94	173				

**Tabla 12. Análisis de varianza de absorbancia UV<sub>254</sub> en el filtro KDF.**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	6868.19	1	6868.19	0.69	0.41	3.90
Dentro de los grupos	1709043.73	172	9936.30			
Total	1715911.92	173				

**Tabla 13. Análisis de varianza de absorbancia UV<sub>254</sub> en el filtro UV.**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	3335.68	1	3335.68	0.31	0.58	3.90
Dentro de los grupos	1862553.47	172	10828.80			
Total	1865889.15	173				