



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

UNAM  
POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA PILOTO PARA LA  
POTABILIZACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA

TESINA

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA

PRESENTA:

I.Q. SOLEN MAGALY ROMERO BELTRÁN

DIRECTORA DE TESINA

DRA. ALMA CONCEPCIÓN CHÁVEZ MEJÍA

Ciudad de México

2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Programa Único de Especializaciones de Ingeniería por permitirme acceder a la mejor educación superior del país.

Al Instituto de Ingeniería por abrirme sus puertas, en especial al Grupo de Tratamiento y Reúso por permitirme ser parte de un equipo con tan merecido prestigio y por el apoyo brindado por parte de cada uno de sus miembros.

A mi asesora la Dra. Alma Chávez Mejía por su apoyo y enseñanza en la realización de este proyecto y durante el tiempo en que me ha permitido colaborar con ella.

Al proyecto número 6335 "Aseguramiento de la cantidad y calidad del agua almacenada en proyectos de captación de agua de lluvia en México", por el apoyo financiero brindado para la realización de este trabajo.

A los miembros de la Academia Mexicana de Ciencias por el apoyo y la buena disposición brindada durante todo el periodo del muestreo, en especial al Sr. Rodolfo Rojas Cruz.

Al Laboratorio de Ingeniería Ambiental por haberme permitido hacer uso de sus instalaciones y equipos para poder desarrollar la parte experimental de esta tesina, así como al Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, en especial a la bióloga Livia Sánchez Rueda por su supervisión y enseñanzas. A Gerardo Sámano Romero por la ayuda brindada en la parte experimental de este trabajo.

A mi familia por todo el apoyo que me ha dado a lo largo de este camino.

"Este trabajo fue realizado en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental que cuenta con certificación de la calidad ISO 9001:2008 otorgada por el Instituto Mexicano de Normalización y Certificación, A.C. (IMNC) con registro RSGC 960 de fecha 11 de enero de 2016, vigente al 11 de enero de 2019"

## RESUMEN

En este trabajo se evaluó la variabilidad de la calidad de agua tanto del sistema que almacena agua de lluvia así como la potabilizada mediante sistemas de barreras múltiples con la finalidad de producir agua para uso doméstico. En este último, se comparó la eficiencia de remoción de tres diferentes barreras de pulimiento que incluyó carbón activado con plata, la lámpara de luz UV con base en diversos indicadores de contaminación y de manera adicional se evaluó el comportamiento del tamaño de las partículas del agua antes y después de la potabilización como técnica alterna de cuantificación de contaminantes.

Para su realización se llevó a cabo el muestreo en el reservorio del auditorio "Galileo Galilei" seleccionando dos puntos de muestreo de acuerdo a la profundidad del muestreo denominados "Fondo" y "Superficie". El periodo de muestreo comprendió del 19 de mayo del 2016 al 17 de enero del 2017, dando un total de 26 muestreos y 52 muestras (26 para Fondo y 26 para Superficie) las cuales fueron caracterizadas.

La planta potabilizadora piloto operó durante el periodo comprendido entre el 20 de octubre del 2016 al 17 de enero del 2017. Durante 8 semanas esta planta trató diariamente cerca de 9 L. El tren de tratamiento propuesto está compuesto por una doble barrera inicial (filtro de arena y filtro de carbón activado) con tres posibles opciones de pulimiento (filtro de carbón activado con plata, KDF y lámpara de luz ultravioleta), las cuales fueron evaluadas y comparadas por medio de la caracterización del agua a la salida de cada una de las etapas de la planta potabilizadora.

Los resultados obtenidos en la caracterización del agua de lluvia captada en la AMC sin tratamiento, presentaron variabilidad en la calidad con respecto al tiempo y con respecto al punto de muestreo en el reservorio por lo que es importante considerar un proceso de potabilización.

Al realizar la comparación de las tres barreras de pulimiento se pudo concluir que la de mejor desempeño para nuestro caso de estudio fue la barrera de carbón activado con plata, la lámpara de luz UV también presenta buenos resultados, el desempeño del KDF fue evidentemente inferior, dichos resultados se presentan en las eficiencias de remoción, para el parámetro de turbiedad se obtuvo una remoción del 39% para PC, 33% para UV y 31% para KDF. Para el parámetro de color verdadero se obtuvo 44% de remoción para PC, 17% UV y 2% para KDF.

Finalmente el parámetro de distribución de partícula arroja buenos resultados en la caracterización del agua siendo este un método más rápido en comparación con la medición de los parámetros convencionales, ayudando así en la evaluación del funcionamiento de la planta de potabilización de manera más efectiva.

# ÍNDICE

RESUMEN .....	III
ÍNDICE DE MAPAS .....	V
ÍNDICE DE TABLAS .....	V
ÍNDICE DE GRÁFICAS .....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VI
CAPÍTULO 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.3 OBJETIVOS.....	5
1.3.1 <i>Objetivos Generales</i> .....	5
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	5
1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES .....	5
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	6
2.1 ANTECEDENTES .....	6
2.1.1 <i>Distribución global del agua</i> .....	6
2.1.2 <i>Situación del agua en México</i> .....	7
2.1.3 <i>Sistemas de captación de agua de lluvia</i> .....	8
2.1.3.1 Principales componentes.....	9
2.1.3.2 Ventajas y desventajas de los sistemas de captación .....	10
2.1.4 <i>Calidad del agua de los sistemas de captación</i> .....	10
2.1.5 <i>Parámetros de calidad del agua</i> .....	11
2.1.5.1 Tamaño de partícula .....	14
2.1.5 <i>Normatividad</i> .....	18
2.1.6 <i>Barreras para la potabilización del agua de lluvia captada</i> .....	18
2.2 SITIO DE ESTUDIO .....	22
2.2.1 <i>Localización</i> .....	22
2.2.2 <i>Condiciones climatológicas</i> .....	22
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA.....	25
3.1 PUNTOS DE MUESTREO .....	25
3.2 MUESTREO .....	25
3.3 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA CAPTADA.....	26
3.4 PLANTA PILOTO PARA LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA CAPTADA.....	29
3.4.1 <i>Instalación de la planta potabilizadora</i> .....	29
3.4.2 <i>Operación de la planta</i> .....	33
3.4.3 <i>Toma de muestras y caracterización del agua</i> .....	34
CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	36

4.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA CAPTADA.....	36
4.2 PLANTA PILOTO, CARACTERIZACIÓN DEL AGUA EN CADA ETAPA.....	44
4.3 COMPARACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS .....	48
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	51
REFERENCIAS.....	53
ANEXO 1 MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DEL AGUA.....	57
ANEXO 2 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CARACTERIZACIÓN.....	65

## ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1 Localización de la AMC. Fuente: Elaboración propia .....	22
Mapa 2 Clima de la ciudad de México por regiones. Fuente: INEGI, 2010.....	23

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ventajas y desventajas que presentan los SCALL.....	10
Tabla 2 Equipos de análisis que utilizan el principio de Coulter.....	17
Tabla 3 Ventajas y desventajas que presentan las barreras seleccionadas. Fuente: Elaboración propia.....	20
Tabla 4 Función de las barreras seleccionadas. Fuente: adaptación de PROFECO, 2000.....	21
Tabla 5 Principales características de las barreras seleccionadas. Fuente: Elaboración propia.....	31
Tabla 6 Datos de operación para el día 18/11/2016.....	33
Tabla 7 Resultados obtenidos en la caracterización del agua de lluvia captada en el punto "Fondo" (n=26 muestras).....	36
Tabla 8 Resultados obtenidos en la caracterización del agua de lluvia captada en el punto "Superficie" (n=26 muestras).....	37
Tabla 9 resultados obtenidos para CT en la planta piloto.....	47

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Resultados obtenidos de pH para ambos puntos de muestreo .....	38
Gráfica 2 Resultados obtenidos de turbiedad para ambos puntos de muestreo.....	38
Gráfica 3 Resultados obtenidos de color verdadero para ambos puntos.....	39
Gráfica 4 Valores obtenidos de SST para ambos puntos.....	39
Gráfica 5 Distribución de partícula en el punto de muestreo "Fondo" .....	41

Gráfica 6 distribución de partículas en el punto de muestreo "Superficie" .....	42
Gráfica 7 Distribución de partículas en ambos puntos de muestreo .....	43
Gráfica 8 Comparación de los valores medios obtenidos con respecto a la normatividad .....	44
Gráfica 9 Resultados de pH en la planta piloto .....	45
Gráfica 10 Resultados de turbiedad obtenidos en la planta piloto .....	45
Gráfica 11 Resultados del color verdadero para la planta piloto .....	46
Gráfica 12 Resultados obtenidos de Abs UV en la planta piloto .....	46
Gráfica 13 Comparación de las barreras de acuerdo a su distribución de partícula .....	50

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Distribución del tamaño de los contaminantes en el agua. Fuente: Levine et al., 1991.....	14
Figura 2 Tamaños y técnicas de medición en el agua. Fuente: Levine et al., 1991...15	15
Figura 3 Diagrama del funcionamiento del Coulter Counter .....	17
Figura 4 Ubicación del sitio de muestreo. Fuente: Elaboración propia .....	25
Figura 5 Reservorio ubicado en el interior del auditorio.....	26
Figura 6 Potenciómetro utilizado para la medición del pH.....	27
Figura 7 Turbidímetro HACH.....	27
Figura 8 Espectrofotómetro DR 5000, HACH .....	28
Figura 9 Procedimiento para la medición del tamaño de partícula.....	29
Figura 10 Instalación de la planta piloto .....	30
Figura 11 Preparación del material y llenado de filtro de arena.....	30
Figura 12 Diagrama general de la planta potabilizadora piloto. Fuente: Elaboración propia. ....	32
Figura 13 Planta piloto para la potabilización del agua de lluvia captada en la AMC .....	32
Figura 14 Medición del gasto de la barrera KDF .....	33
Figura 15 Toma de muestras en cada punto de muestreo de la planta piloto .....	34
Figura 16 Toma de muestra para el parámetro de CT y CF .....	35
Figura 17 SST para tres diferentes fechas de muestreo para ambos puntos .....	40
Figura 18 Resultados de CT por medio del método Simplate .....	48

# CAPÍTULO 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## 1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad la humanidad enfrenta serios problemas en varios ámbitos; uno de ellos y de enorme importancia es el deterioro de los recursos naturales considerados hasta hace poco como renovables (SEMARNAT, 2014).

En las últimas décadas se ha observado un acelerado proceso de sobreexplotación de la mayoría de ellos; dentro de los más importantes destaca el recurso agua, cuyas fuentes de aprovechamiento, tanto superficial como subterránea, han tenido un deterioro constante, ocasionando que se presente baja o escasa disponibilidad del recurso en muchas regiones del mundo (SEMARNAT, 2014).

De acuerdo con Toledo (2002) parte de este problema se debe al acelerado crecimiento de la población y su desigual distribución en el planeta, cerca del 75 % de la población humana se concentra en países y regiones donde sólo existe el 20 % de la disponibilidad de agua.

Uno de los grandes desafíos hídricos que se enfrenta a nivel nacional es dotar de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento a la población, debido, por un lado, al crecimiento demográfico acelerado y por otro, a las dificultades técnicas, cada vez mayores, que conlleva hacerlo (CONAGUA, 2016).

La problemática del agua es un tema que ocupa actualmente un lugar en las agendas gubernamentales de los diferentes países, sobre todo en lugares donde la disponibilidad per cápita es muy baja. México no es la excepción, la problemática en la gestión integral de los recursos hídricos se hace, día a día, más crítico sobre todo en la calidad y disponibilidad de agua para consumo humano (Cervantes *et al.*, 2015).

El agua es esencial para la vida y todas las personas deben disponer de un suministro satisfactorio (suficiente, inocuo<sup>1</sup> y accesible). La mejora del acceso al agua potable puede proporcionar beneficios tangibles para la salud (OMS, 2006).

En nuestro país el problema de abastecimiento de agua aún no está resuelto, de acuerdo con la Encuesta Intercensal 2015 para el año 2015, 5.6 millones de mexicanos no cuentan con el servicio de agua potable (4.7%).

El acceso al agua potable es fundamental para la salud, uno de los derechos básicos y un componente de las políticas eficaces de protección de la salud, es una cuestión

---

<sup>1</sup> De acuerdo con las Guías para la calidad del agua potable, que no ocasiona ningún riesgo significativo para la salud cuando se consume.

importante en materia de salud y desarrollo en los ámbitos nacional, regional y local (OMS, 2006).

La experiencia ha demostrado asimismo que las medidas destinadas a mejorar el acceso al agua potable favorecen en particular a la población con menos recursos, tanto de zonas rurales como urbanas, y pueden ser un componente eficaz de las estrategias de mitigación de la pobreza (OMS, 2006).

Contar con este servicio en el hogar es un factor determinante en la calidad de vida y desarrollo integral de las familias. En México, la población beneficiada ha venido creciendo los últimos años; sin embargo, mientras más nos acercamos a la cobertura universal, la tarea se vuelve más compleja (CONAGUA, 2016).

De acuerdo con Anaya y Martínez (2007) en la mayoría de las áreas urbanas el adecuado abastecimiento de agua para satisfacer la creciente demanda de la población y asegurar la equidad al acceso del agua resulta un reto significativo y urgente que tienen que considerar las autoridades correspondientes. Por esta razón es necesario proponer soluciones a corto, mediano y largo plazo para lograr la gestión sustentable<sup>2</sup> de este recurso y encontrar nuevas alternativas para su abastecimiento.

Una alternativa con gran potencial es el agua de lluvia, ya que para su colecta sólo se requiere de un sistema de captación el cual tiene ciertas ventajas como: un ahorro de energía, ya que se evita todo el proceso de extracción, sistema de distribución y bombeo para su transporte al área de suministro y el tratamiento requerido para garantizar la calidad adecuada para el consumo humano, es relativamente barato. Una desventaja es que la disponibilidad de agua se limita a las temporadas de precipitación y varía para cada región del país, además del tamaño del área de captación y del tamaño del almacenamiento (Rojas *et al.*, 2012).

La implementación y los estudios realizados en la implementación e introducción de los sistemas de captación para el ahorro del agua y fuente de abastecimiento son más comunes tanto a nivel internacional como nacional.

A pesar de esto, la mayoría de los estudios de la captación de agua de lluvia, se encuentran enfocados al ahorro del agua sin tomar en cuenta la calidad de la misma, que es de gran importancia para conocer el tratamiento que se le debe dar (Rojas *et al.*, 2012).

Muchos de los problemas de salud pública están relacionados con la contaminación del agua y los hábitos de higiene, el acceso al agua de buena calidad es uno de los factores más importantes para mejorar la salud de las personas (RAIN, 2008).

---

<sup>2</sup> De acuerdo con el Informe Brundtland, el desarrollo sustentable es la capacidad de satisfacer necesidades de las generaciones actuales sin comprometer los recursos y oportunidades para el crecimiento y desarrollo de las generaciones futuras.

Es importante garantizar la seguridad del agua ya que de no ser así la comunidad puede quedar expuesta al riesgo de brotes de enfermedades intestinales y otras enfermedades infecciosas. Es particularmente 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).

Las enfermedades relacionadas con la contaminación del agua de consumo tienen una gran repercusión en la salud de las personas. Las medidas destinadas a mejorar la calidad del agua de consumo proporcionan beneficios significativos para la salud (OMS, 2006).

Ante ello, es de suma importancia realizar estudios de la calidad del agua captada en cada sitio de estudio ya que esta puede variar para cada caso, para así determinar si esa agua es segura o si se requiere de un tratamiento y de qué tipo para su posterior aprovechamiento.

A este respecto, la Academia Mexicana de Ciencias (AMC) es una asociación civil independiente y sin fines de lucro que agrupa a miembros de destacadas trayectorias académicas y que laboran en diversas instituciones del país y del extranjero. Una de sus instituciones se localiza en la Delegación Tlalpan de la Ciudad de México.

La AMC cuenta con un sistema de captación de agua de lluvia, localizado en su auditorio "Galileo Galilei", el agua recolectada por el sistema es enviada a la cisterna en el interior del edificio. El sistema de captación no cuenta con un tren de tratamiento y no se cuentan con datos de la calidad de la misma por lo que el agua captada solo se utiliza para el riego de jardines y macetas pero sugiere un gran potencial e interés para ser empleada como fuente de abastecimiento futuro.

Ello debido a que las zonas altas del sur de la Ciudad de México se caracterizan por tener los mayores problemas de disponibilidad de este recurso hídrico, debido a esta situación, la AMC se abastece de agua potable mediante pipas, por lo que la potabilización del agua de lluvia captada en dicha edificación podrá ser utilizada como una fuente alterna de abastecimiento.

Ante ello, el objetivo de este trabajo es implementar un sistema a base de barreras múltiples para la potabilización del agua de lluvia captada así como la evaluación de la calidad del agua en cada componente del sistema.

El presente trabajo se estructura en cinco capítulos; en el primero de ellos se presenta una breve descripción de la situación del agua en materia de acceso, calidad, disponibilidad y alternativas para su abastecimiento, se describe el problema a tratar, la delimitación del problema y los objetivos planteados, así como los alcances y limitaciones del mismo.

La teoría involucrada que sustenta la realización de este trabajo, los antecedentes que existen sobre el tema así como la revisión y comparación con trabajos similares son presentados en el segundo capítulo.

El tercer capítulo contiene la metodología empleada para la obtención de los resultados presentados en el trabajo, en este se presenta la selección de los puntos de muestreo, la realización del mismo, la caracterización del agua captada y por último la implementación y evaluación de la calidad del agua de la planta piloto para la potabilización del agua de lluvia captada.

En el cuarto capítulo se incluye el análisis de los resultados obtenidos tanto de los parámetros evaluados en la caracterización del agua proveniente del sistema de captación como de los obtenidos en las diferentes etapas de la planta piloto propuesta.

En el último de los capítulos se incluyen las conclusiones que se obtuvieron con la realización del trabajo y una serie de recomendaciones para futuras investigaciones y acciones que se podrían llevar a cabo a partir de los resultados obtenidos. Se presentan una serie de anexos donde se podrá conocer a detalle los procedimientos utilizados en la caracterización, la memoria fotográfica de la realización de estos así como los resultados obtenidos en los parámetros de calidad el agua.

### 1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El agua interviene en todos los ámbitos de la vida social y económica de nuestra sociedad. Influye decisivamente en la calidad de vida de la población, pues su ausencia o mala calidad deriva en afectaciones a la salud y bienestar.

Es de gran importancia buscar alternativas para el abastecimiento del agua en zonas en donde el servicio es insuficiente o de mala calidad. La captación de agua de lluvia constituye un método alternativo o complementario para el suministro de este recurso.

Particularmente en la AMC donde el abastecimiento de agua se realiza mediante pipas, resultando en un método insostenible, ineficiente y sobre todo costoso. A pesar de que estos cuentan con un sistema de captación de agua de lluvia en sus instalaciones el agua captada esta no se utiliza para uso potable ya que este sistema no cuenta con un sistema de tratamiento para este fin.

Aunado a ello, no se cuentan con datos de la calidad del agua de lluvia captada lo cual resulta en un factor limitante al no conocer las características tanto físicas, químicas como microbiológicas para establecer el uso adecuado que podría dársele al recurso, además de decidir si el agua califica para el propósito de uso potable.

Para poder utilizar el agua de lluvia captada como una fuente alterna de abastecimiento es imprescindible conocer su calidad mediante la caracterización de

la misma y establecer un tratamiento de potabilización adecuado que garantice la calidad requerida para el cumplimiento de la normatividad vigente.

De esta forma, la AMC recibirá entonces beneficios derivados del aprovechamiento de un recurso seguro para uso potable, les permitirá un ahorro monetario y estarán contribuyendo a disminuir la demanda del recurso por medio de una alternativa que no depende del agua superficial o subterránea, de la misma manera permitirá hacer conciencia y promoverá en comunidades cercanas el uso de este sistema.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 OBJETIVOS GENERALES

Evaluar la calidad del agua de un sistema de potabilización del agua de lluvia captada en la Académica Mexicana de Ciencias.

#### 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar la calidad del agua de lluvia captada en la Académica Mexicana de Ciencias previo a su proceso de potabilización.

Comparar la eficiencia de remoción de tres diferentes barreras de pulimiento que componen el tren de potabilización de agua de lluvia con base en diversos indicadores de contaminación.

Evaluar el comportamiento del tamaño de las partículas del agua antes y después de la potabilización como técnica alterna de cuantificación de contaminantes

### 1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES

En este trabajo se evaluará la calidad del agua en un sistema de captación de agua de lluvia en una edificación de la AMC. Se realizará el muestreo del agua para su posterior caracterización, obteniendo una base de datos con los parámetros fisicoquímicos y biológicos y tamaño de partícula que nos permitirá proponer un prototipo de planta potabilizadora.

Se propondrá en operación la planta piloto para el tratamiento agua de lluvia captada, evaluando y comparando tres posibles barreras de pulimiento de manera paralela lo cual nos permitirá elegir el más adecuado para nuestro caso de estudio.

Una vez evaluada la planta piloto en cada una de sus etapas de tratamiento, se expondrán los resultados a los miembros de la AMC para que posteriormente se apruebe su instalación, se realice el dimensionamiento de la planta piloto para el sitio de estudio y se lleve a cabo su instalación y operación de la misma, lo cual queda fuera de los alcances de este trabajo.

## CAPÍTULO 2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 2.1 ANTECEDENTES

#### 2.1.1 DISTRIBUCIÓN GLOBAL DEL AGUA

El agua es un componente muy importante para la vida, entorno a ella se desarrollan actividades sociales y económicas, es un recurso natural con valor ecológico y económico.

De acuerdo con Toledo (2002) en el artículo El agua en México y en el mundo se menciona que:

De los aproximadamente 113 000 km<sup>3</sup> de agua que se precipitan cada año sobre la Tierra en el ciclo hidrológico<sup>3</sup>, cerca de 71 000 km<sup>3</sup> se evaporan y retornan a la atmósfera, el resto, unos 42 000 km<sup>3</sup>, recargan los acuíferos o retornan a los océanos por la vía de los ríos. Constituyen los recursos acuáticos renovables, las aguas dulces del planeta. Sin embargo, los volúmenes realmente disponibles de estos recursos sólo se estiman entre 9000 a 14 000 km<sup>3</sup>. Y lo que es más: un monto sustancial, aproximadamente el 70%, es necesario para sostener los ecosistemas terrestres, lo que reduce a un 30%, unos 4200 km<sup>3</sup>, las disponibilidades reales para todos los usos humanos directos (...) Sin embargo, los recursos acuáticos del planeta varían considerablemente en espacio y tiempo (...).

La mayoría de los recursos de agua dulce del planeta se concentran en sólo seis países: Brasil, Rusia, Canadá, EE.UU., China e India. Más del 40% de los ríos del mundo se concentran en estos países. El mayor de ellos, el Amazonas, contribuye con el 16% de los montos totales descargados por los ríos del planeta. El 27% del agua dulce de la Tierra corresponde a los aportes de cinco grandes cuencas<sup>4</sup> de agua: Amazonas, Ganges-Bramaputra, Congo, Yantzé y Orinoco. Los ríos con flujos promedios superiores a los 100 km<sup>3</sup> por año concentran el 46% de los recursos de agua dulce de la Tierra. Pero estos flujos son estacionales. Cerca del 45 al 55% tienen lugar en los periodos lluviosos del año. La cantidad de recursos acuáticos en los continentes varía de acuerdo con las estaciones del año. Por ejemplo: la mayor parte de los flujos en los ríos de Europa ocurren entre abril y julio (46%),

---

<sup>3</sup> El ciclo hidrológico se define como: Sucesión de fases por las que pasa el agua en su movimiento de la atmósfera a la Tierra y en su retorno a la misma: evaporación del agua del suelo, del mar y de las aguas continentales, condensación en forma de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o en masas de agua y reevaporación. (OMM/UNESCO, 2012).

<sup>4</sup> Cuenca. Área que tiene una salida única para su escorrentía superficial. (OMM/UNESCO, 2012).

en Asia, durante junio y octubre (54%), en África en septiembre-diciembre (44%), Sudamérica durante abril-julio (45%) y Australia y Oceanía durante enero-abril (46%). En promedio cerca del 46% del total global de las descargas de los ríos ocurren entre mayo y agosto.

### 2.1.2 SITUACIÓN DEL AGUA EN MÉXICO

En países en desarrollo como el nuestro, nos enfrentamos a una mayor competencia por el acceso al agua en las próximas décadas, debido al crecimiento demográfico, nuevos hábitos de vida y el desarrollo urbano e industrial sin una adecuada gestión.

En el ciclo hidrológico, una proporción importante de la precipitación pluvial regresa a la atmósfera en forma de evapotranspiración, mientras que el resto escurre por los ríos y arroyos delimitados por las cuencas, o bien se infiltra en los acuíferos (CONAGUA, 2014a).

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

En lo que se refiere al agua subterránea, de acuerdo con CONAGUA (2014b) el país está compuesto por 653 acuíferos. La importancia del agua subterránea se manifiesta en la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios. Alrededor del 37% del volumen total concesionado para usos consuntivos<sup>5</sup> (30 374 millones de metros cúbicos por año al 2013), pertenece a este origen.

El mayor problema de esta fuente de abastecimiento es la extracción excesiva (se extrae más agua de la que se infiltra), debido a ella del 2001 al 2014 el número de acuíferos sobreexplotados ha oscilado entre 100 y 106 de un total de 653.

Debido a esta situación es necesario encontrar alternativas para el abastecimiento del agua. La captación del agua de lluvia constituye un método opcional para el suministro de agua en los hogares, de acuerdo con Herrera (2010), la captación de agua de lluvia para consumo humano es recomendada en primera instancia para zonas rurales, urbano marginales, con niveles de precipitación pluviométrica que hagan posible el adecuado abastecimiento de

---

<sup>5</sup> De acuerdo con (CONAGUA, 2007) se han agrupado los usos del agua en cinco grandes grupos; cuatro de ellos corresponden a usos consuntivos, es decir agrícola, el abastecimiento público, la industria autoabastecida y las termoeléctricas.

agua de la población beneficiada y que no cuentan con acceso a fuentes superficiales cercanas, y donde el nivel freático de las agua subterráneas sea muy bajo, dicho autor también recomienda hacer provecho de la captación de agua en todas las zonas pobladas aunque exista un sistema de abastecimiento; considerando así a la captación de agua como un sistema alternativo o complementario de distribución de agua.

En nuestro país de acuerdo con Herrera (2010) se han estado realizando cada vez más estudios relacionados con este método, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), a través de su Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua ha realizado investigación en este campo, adaptando tecnología en comunidades rurales del norte del estado de Morelos para la captación del agua de lluvia.

En el año 2003 se constituyó el Centro Internacional de Demostración y Capacitación en Aprovechamiento del Agua de Lluvia del Colegio de Postgraduados de la Universidad Autónoma Chapingo (CIDECALLI-CP). Algunas de sus actividades han sido:

- Elaboración y ejecución de proyectos sobre sistemas de captación de agua de lluvia para consumo humano y uso doméstico, en las comunidades Mazahua y Purépecha, en el Estado de Michoacán, en la Mixteca Oaxaqueña y Guadalajara, entre otros.
- Diseñar y construir cinco diferentes modelos de sistemas de captación de agua de lluvia los cuales se encuentran en el Campus Montecillo, del Colegio de Posgraduados de la Universidad Autónoma Chapingo.

Aunque en México las condiciones geográficas son favorables y el desarrollo de este tipo de tecnología es de bajo costo, fácil de construir e implementar, implica poco o nulo consumo de energía y bajo impacto ambiental, en la mayoría del país su uso está limitado a un medio de abastecimiento sólo aplicado en casos extremos de escasez. Existe poca información e interés sobre el potencial de este recurso como una solución sustentable al problema del agua e incluso cierta resistencia a la implementación de estas tecnologías por falta de estudios sobre el tema (García, 2012).

### 2.1.3 SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA

Un sistema de captación de agua de lluvia (SCALL) constituye un medio para interceptar la precipitación con el objetivo de obtener agua, almacenarla y poder disponer de ella para darle un determinado uso, con o sin tratamiento previo lo cual dependerá de su calidad y del uso al cual será destinada.

De acuerdo con Herrera (2010), los SCALL pueden ser clasificados por su uso, como son: los sistemas para uso agrícola o ganadero, sistemas para la recarga de

acuíferos y los sistemas para uso humano, este último caracterizado por utilizar la superficie del techo como captación.

### 2.1.3.1 PRINCIPALES COMPONENTES

Los SCALL no tienen grandes variaciones entre sí, la mayoría consta básicamente de tres componentes: captación, conducción y almacenamiento (Abdulla y Al-Shareef, 2006).

**ÁREA DE CAPTACIÓN.**- Se refiere a la superficie que va a recolectar el agua de la lluvia. Puede ser natural, como roca o artificial. En este último caso, las superficies pueden ser de materiales como los siguientes:

- cemento;
- lámina metálica, plástica, fibra de vidrio o vidrio;
- tejas de arcilla, madera o plásticas;
- y palma u hojas de alguna otra planta.

Las superficies mencionadas generalmente se usan como techos; por sus características, algunas ofrecen ventajas sobre otras para la captación y aprovechamiento de la lluvia. Por ejemplo las láminas plásticas de policarbonato ofrecen más cantidad y mejor calidad del agua colectada que las de madera o palma.

**CONDUCCIÓN.**- El sistema requiere elementos para transportar el agua colectada hacia el lugar de aprovechamiento, tratamiento o almacenamiento, para lo cual se usan comúnmente canaletas y tuberías que pueden ser de los siguientes materiales:

- plásticas: policloruro de vinilo (PVC), polietileno de alta densidad (HDPE) o polipropileno;
- metálicas: lámina de acero galvanizada o zinc;
- y materiales naturales: madera y fibras.

**ALMACENAMIENTO.**- El lugar donde se conservará el agua captada puede ser muy variado y de sus características depende la calidad que mantendrá el líquido previo a su aprovechamiento. Puede ir desde zanjas naturales hasta tanques especiales. Algunos ejemplos de contenedores superficiales o subterráneos son:

- Concreto: cisternas.
- Metálicos: botes, tinacos o cisternas de lámina de acero.
- Plásticos: botes, tinacos o cisternas.

Dependiendo de los usos para los cuales el sistema esté diseñado y de su complejidad, existen otros componentes adicionales, de acuerdo con Gould y Nissen-Petersen (1999), existen componentes complementarios como filtro para hojas y sólidos de gran tamaño, interceptores de primeras lluvias, sedimentadores y

filtros y dispositivos de desinfección que repercuten directamente en la calidad del agua.

2.1.3.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS DE CAPTACIÓN

Hablando en términos generales en la tabla 1 se presentan las ventajas y desventajas que presentan los SCALL con respecto a los otros sistemas de abastecimiento de agua de acuerdo con Abdulla y Al-Shareef (2006) y Water Texas Development Board (2005).

TABLA 1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS QUE PRESENTAN LOS SCALL

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Reducción en el consumo de agua potable de otras fuentes reduciendo costos</p> <p>No se requiere energía para la operación del sistema.</p> <p>El uso final del agua recolectada está situado cerca de la fuente, eliminando la necesidad de sistemas de distribución complejos y costosos.</p> <p>Alta calidad fisicoquímica del agua de lluvia.</p> <p>El agua lluvia reduce en cierta medida las inundaciones y la erosión.</p> <p>La construcción es fácil pues se puede utilizar materiales de la zona; fácil de mantener.</p>	<p>Dependen directamente de la cantidad de precipitación que se presente en la zona y del área de captación.</p> <p>Los costos iniciales de construcción del sistema son altos, especialmente del tanque de almacenamiento, lo que puede volverlo inaccesible para algunas poblaciones.</p> <p>El costo del proceso de tratamiento depende de la calidad del agua captada y el uso que se dará a la misma, sustentado por las normas correspondientes.</p>

2.1.4 CALIDAD DEL AGUA DE LOS SISTEMAS DE CAPTACIÓN

La implementación de los SCALL no depende solamente de la cantidad de lluvia u oferta hídrica disponible en un determinado lugar, sino también de la calidad de ésta y con base al uso que se le quieren dar (Mitchell *et al.*, 2008).

Existen diferentes factores que afectan la calidad del agua de lluvia captada en los SCALL, como la presencia de excrementos de aves y pequeños mamíferos en el techo (área de captación) o en los canales de conducción, presencia de materia orgánica por medio de la degradación de hojas o ramas provenientes de árboles cercanos al sistema, descuido en el tanque de almacenamiento, presencia y acumulación de sólidos en el techo (OMS, 2006).

Así mismo, se ha encontrado que la concentración de contaminantes presentes en el agua de lluvia depende también de depósitos atmosféricos durante la época de lluvia y secas, de las características (principalmente tipo de material) de la superficie de captación y del tipo de zona (urbana o rural, Göbel *et al.*, 2007).

De acuerdo con Göbel *et al.*, (2007) se reporta que las concentraciones típicas en áreas urbanas de metales presentes en las aguas de escorrentía, como resultado de la corrosión de las superficies de los tejados pueden variar de 0.1 µg/L a 32 µg/L, para Cd; de 3 µg/L a 247 µg/L, para Cu; de 16 µg/L a 2764 µg/L, para Pb y de 802 µg/L a 38061 µg/L, para Zn. Estos metales provienen de partículas de polvo como resultado de procesos de combustión, industrias de metales ferrosos y no ferrosos, plantas de incineración, industrias cementeras o vidrieras, tráfico vehicular y principalmente de la corrosión de los materiales de los techos de captación.

Se ha hallado, además, que en aguas de escorrentía sobre superficies de tejados se encuentran concentraciones de sólidos suspendidos totales, entre 3 mg/L y 304 mg/L, demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días (DBO<sub>5</sub>) entre 1 mg/L y 27 mg/L y valores bajos de pH (entre 4.7-6.8).

De acuerdo con Rojas (2012), estudios realizados en países como Corea, Nigeria, Australia y Nueva Zelanda coinciden en la presencia de indicadores microbiológicos como *Escherichia coli* y coliformes totales provenientes del agua de lluvia de una cisterna de captación sin tratamiento.

Sin embargo en el estudio realizado por García *et al.*, (2009), en el sur de la Ciudad de México (Ciudad Universitaria, UNAM), se obtuvieron valores de concentraciones de metales como Cd, Cu, Pb, Zn, Al, Cr y Fe por debajo de los valores establecidos en la normatividad mexicana con respecto a la calidad del agua potable.

De igual manera en el estudio realizado por García (2012), en el sur poniente de la Ciudad de México para el agua captada en un techo de concreto se obtuvieron valores de color verdadero de 15 a 25 Pt-Co, turbiedades de 1 a 4 UTN, sólidos suspendidos totales con valores entre 15 y 35 mg/L, valores de pH entre 7 y 8. En cuanto a indicadores microbiológicos se encontraron valores de coliformes fecales entre 1 y 8 NMP/100 mL y solo en una de las siete muestras analizadas se encontró 1 UFC/100 mL para coliformes fecales.

De acuerdo con los estudios antes mencionados se puede concluir que la calidad del agua depende de cada sitio de estudio y de las condiciones y cuidados que se tenga con el sistema de captación por lo que es importante realizar la caracterización del agua a utilizar.

El agua destinada para el consumo humano debe ser sometida a tratamiento. Generalmente un sistema de potabilización para el agua de lluvia captada incluye un proceso de filtración y un proceso de desinfección.

#### 2.1.5 PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA

La caracterización del agua permite establecer el tipo de tratamiento que se debe aplicar de acuerdo al uso que se le dará a ésta. Para poder evaluar la

calidad del agua se utilizan parámetros que miden las características físicas químicas y microbiológicas del agua.

De acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994 las características físicas son aquellas que se detectan sensorialmente y tienen directa incidencia sobre las condiciones estéticas y de aceptabilidad del agua, para efectos de evaluación, el sabor y olor se ponderan por medio de los sentidos, el color y la turbiedad se determinan por medio de métodos analíticos de laboratorio; las características químicas son aquellas debidas a elementos o compuestos químicos, que como resultado de investigación científica se ha comprobado que pueden causar efectos nocivos a la salud humana; las características microbiológicas son aquellas debidas a microorganismos nocivos a la salud humana, para efectos de control sanitario se determina el contenido de indicadores generales de contaminación microbiológica, específicamente organismos coliformes totales y organismos coliformes fecales.

Es importante la medición de diferentes parámetros, ya que el valor de estos es decisivo para determinar el uso que se le puede dar al agua. Los principales parámetros de caracterización del agua se dividen en físicos, químicos y microbiológicos.

A continuación se mencionan algunos de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos con su respectiva definición de acuerdo con Rojas (1999).

#### PARÁMETROS FÍSICOS

La turbiedad es la propiedad óptica de una suspensión que hace que la luz sea reemitida y no transmitida a través de la suspensión, puede ser causada por una gran variedad de materiales en suspensión, que varían en tamaño

Las causas más comunes del color del agua son la presencia de hierro y manganeso coloidal o en solución; el contacto del agua con desechos orgánicos, hojas, madera, raíces, etc., en diferentes estados de descomposición, presencia de taninos, ácido húmico y algunos residuos industriales. Dos tipos de color se reconocen en el agua: el color verdadero, es decir el color de la muestra una vez que su turbiedad ha sido removida, y el color aparente que incluye no solamente el color debido al material suspendido. El color aparente se determina sobre la muestra original sin filtración o centrifugación previa.

Los sólidos suspendidos totales (SST) se refieren al material constituido por los sólidos sedimentables, los sólidos suspendidos y coloidales que son retenidos por un filtro con poro de 1.5  $\mu\text{m}$  y secados a una temperatura de 103 a 105 °C.

Los sólidos disueltos totales se refieren al material soluble constituido por materia inorgánica y orgánica que permanece como residuo después de evaporar y secar

una muestra previamente filtrada a través de un filtro con poro de 1.5  $\mu\text{m}$  a una temperatura de 103 a 105 °C.

#### PARÁMETROS QUÍMICOS

El pH es la medida de la intensidad ácida o básica de una disolución. Este se define como el logaritmo inverso de la concentración del ion hidrógeno. Un pH menor de 7 indica acidez en el agua, por encima de un pH de 7 se tienen condiciones básicas en el agua. Cuando el pH es de 7 se dice que el pH es neutro.

Se considera que la dureza total es aproximadamente igual a la dureza producida por los iones calcio y magnesio, un agua dura es aquella que requiere cantidades considerables de jabón para producir espuma y producen incrustaciones en las tuberías, calentadores, calderas y otras unidades en las cuales se incrementa la temperatura del agua.

La alcalinidad del agua puede definirse como su capacidad para neutralizar ácidos, para reaccionar con iones hidrógeno o como la medida de su contenido total de sustancias alcalinas ( $\text{OH}^-$ ). La alcalinidad es debida generalmente a la presencia de los iones bicarbonato, carbonatos e hidróxidos.

El carbono orgánico total (COT) es una medida del control de materia orgánica del agua, es especialmente utilizable en pequeñas concentraciones, en presencia de un catalizador, el carbón orgánico se oxida a  $\text{CO}_2$ .

La demanda química de oxígeno (DQO) es un parámetro de contaminación que mide el material orgánico total contenido en una muestra, mediante oxidación química, es una medida de la cantidad de oxígeno consumido por la porción de materia orgánica existente en la muestra y oxidable por un agente químico oxidante fuerte.

#### PARÁMETROS BIOLÓGICOS

El grupo de microorganismos coliformes es usualmente utilizado como indicador de contaminación bacteriana ya que estos son contaminantes comunes del tracto gastrointestinal tanto del hombre como de los animales de sangre caliente, están presentes en el tracto intestinal en grandes cantidades, permanecen por más tiempo en el agua que bacterias patógenas y se comportan de igual manera que los patógenos en los sistemas de desinfección.

Los coliformes fecales son un subgrupo de los coliformes totales, estos y la *Escherichia coli* (*E. coli*) en particular se han utilizado como indicadores de contaminación fecal debido a que se encuentran casi exclusivamente en las heces de animales de sangre caliente. Aproximadamente el 95% de los coliformes presentes en heces fecales, están formados por *E. coli* y ciertas especies de *Klebsiella*.

2.1.5.1 TAMAÑO DE PARTÍCULA

En la actualidad, las técnicas de conteo de están siendo aceptadas en la industria de tratamiento de agua potable. Esta técnica se está empleando como un instrumento efectivo que da información confiable y rápida para evaluar las metas implementadas en términos de calidad de agua (AWWA, Research Foundation, 2000). Uno de los objetivos de estas técnicas es el de monitorear el desempeño de los procesos de tratamiento de agua y su calidad de manera instantánea.

La literatura demuestra que la relación existente entre el contenido de contaminantes en el agua y en el agua tratada con el tamaño de partícula, proporcionan información importante para el manejo y operación de una planta de tratamiento, así como para el diseño.

De acuerdo con Levine *et al.*, (1991) los contaminante en el agua pueden clasificarse en cuatro grandes clases dependiendo de du tamaño: disueltos (<0.001  $\mu\text{m}$ ), coloides (0.001-1  $\mu\text{m}$ ), supracoloides (1-100  $\mu\text{m}$ ) y sedimentables (>100  $\mu\text{m}$ ).

En la figura 1 se muestra la distribución de tamaños de ciertos contaminantes en el agua.

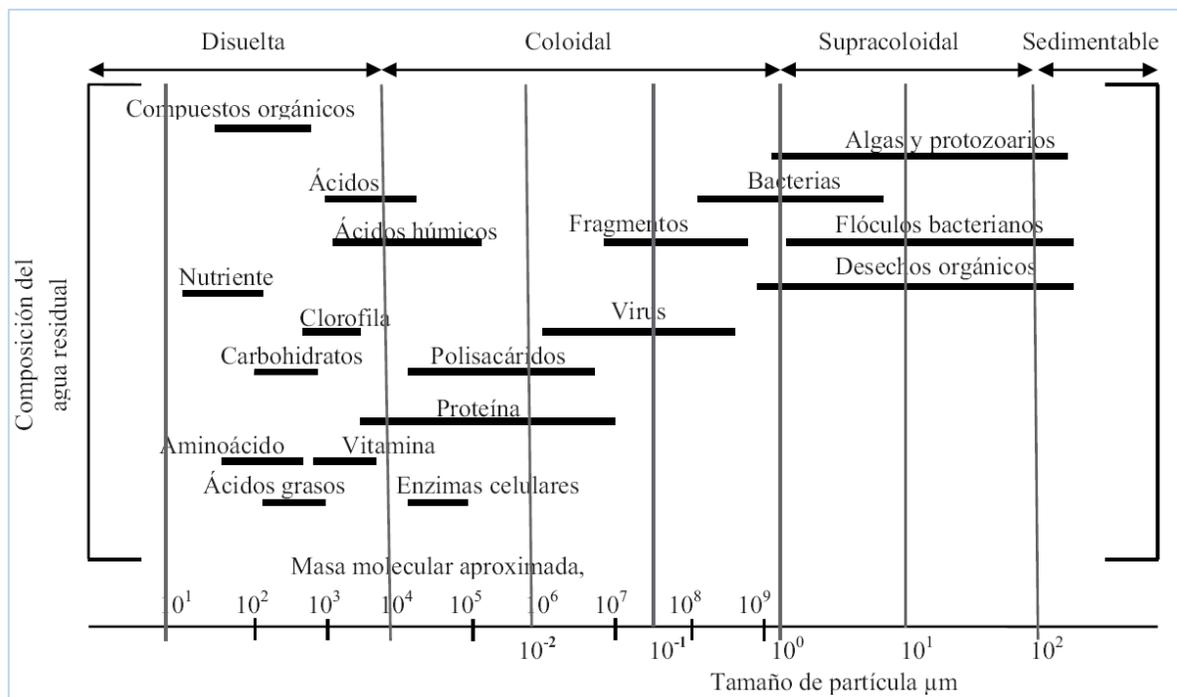


FIGURA 1 DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE LOS CONTAMINANTES EN EL AGUA. FUENTE: LEVINE ET AL., 1991.

Para caracterizar la partícula se puede evaluar el tamaño, el cual es una representación numérica de la longitud física. Sin embargo en el agua la mayoría de las partículas son irregulares por lo que no se puede representar en una sola

dimensión (longitud), como lo es en el caso de partículas esféricas perfectas. Por esta razón es común tomar en cuenta otras propiedades como son el diámetro, área superficial, la masa, el volumen, la velocidad de sedimentación, o la respuesta de un campo eléctrico u óptico (Levine *et al.*, 1991).

Existen diferentes técnicas de análisis para la determinación de los tamaños de partículas, las cuales, varían en complejidad, utilidad y precio. Las técnicas que se emplean para evaluar el tamaño son microscopía y contadores de partícula que tienen como fundamento la dispersión de luz, resistencia eléctrica o bloqueo de luz (Levine *et al.*, 1991).

En la figura 2 se muestran las técnicas de medición en su respectivo intervalo de tamaño de partícula.

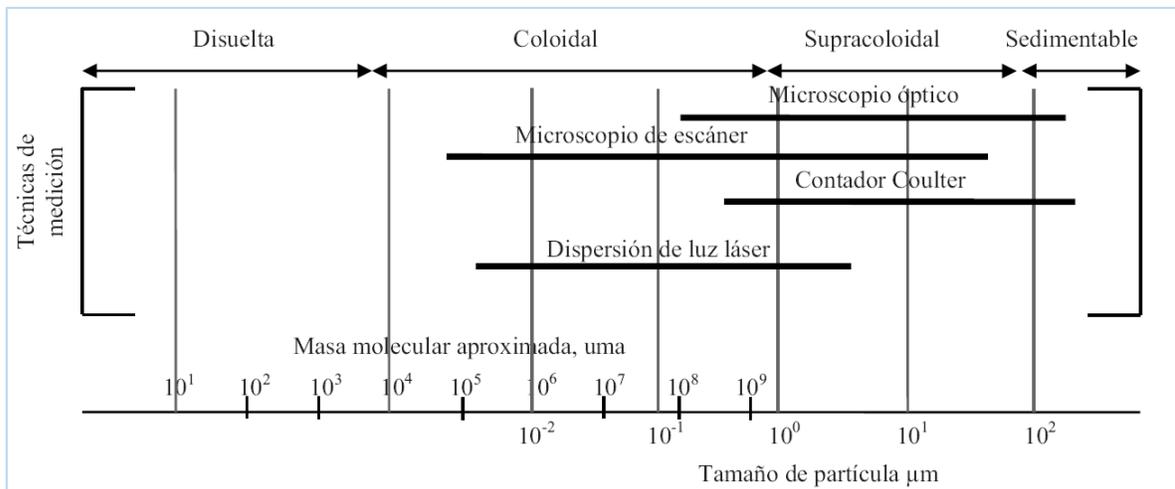


FIGURA 2 TAMAÑOS Y TÉCNICAS DE MEDICIÓN EN EL AGUA. FUENTE: LEVINE *ET AL.*, 1991.

Los contadores de partícula son equipos que combinan los sensores con dispositivos eléctricos de conteo. El sensor detecta la partícula y convierte la información en una señal eléctrica, que posteriormente se introduce en el circuito de conteo, dando una lectura, la cual depende del tipo de equipo que se utiliza (Broadwell, 2001).

Las partículas fluyen a través de una zona sensible en un intervalo de tiempo, en el cual se cuentan las partículas de un volumen conocido de muestra. Los contadores de partícula están basados en tres tipos de sensores:

- Dispersión de luz
- Bloqueo de luz
- Zona de detección eléctrica

Dos de los primeros miden el tamaño de partícula basados en las características ópticas y ambos pueden ser operados con flujo continuo o por lotes; en cambio para el tercero solo se puede operar en forma discreta, por lotes (Broadwell, 2001).

## ZONA DE DETECCIÓN ELECTRICA (PRINCIPIO COULTER)

De acuerdo con Broadwell (2001), en esta técnica se miden los cambios en la conductividad, en donde las partículas de la muestra pasan a través de un orificio con un tamaño de aertura definida, desplazándose por medio de una solución electrolítica provocando un aumento de la resistencia y disminuyendo la corriente. Este cambio de corriente produce una señal eléctrica que es proporcional al diámetro de la partícula. Cada tamaño de partícula es expresado en términos de un volumen esférico equivalente, el cual puede ser convertido matemáticamente en un diámetro esférico equivalente, obteniendo así un resultado expresado en número.

Wallace Coulter desarrollo una técnica que permite en suspensiones líquidas contar y medir partículas simultáneamente. Este tipo de medición es conocido como Coulter (registrado por Coulter Corporation). El 1998 la compañía fue comprada por Beckman y así fue renombrado como Beckman Coulter.

El principio de operación del instrumento se presenta en la figura 3. La muestra a ser analizada es dispersa en un electrolito colocado en un vaso. En el tubo de vidrio del tamaño de la muestra a analizar, se encuentra un electrodo de platino que también está inmerso en el electrolito.

Un vacío inicia el flujo de la suspensión a través del orificio hacia dentro del tubo de vidrio separando los dos electrodos entre los cuales hay un flujo de corriente eléctrica. Como cada partícula pasa a través de la apertura cilíndrica (o "zona de detección") este desplazamiento del propio volumen del líquido, momentáneamente incrementa la impedancia<sup>6</sup> de la apertura.

Estos cambios en la impedancia producen un diminuto pero proporcional flujo de corriente hacia un amplificador que convierte las fluctuaciones de corriente en pulsos de voltaje lo suficientemente largos como para medir con precisión. La amplitud de tal pulso es directamente proporcional al volumen de la partícula. Dando una escala a esos pulsos altos en unidades de volumen permite realizar y desplegar un espectro de tamaños.

---

<sup>6</sup> Resistencia aparente de un circuito dotado de capacidad al flujo de una corriente eléctrica alterna.

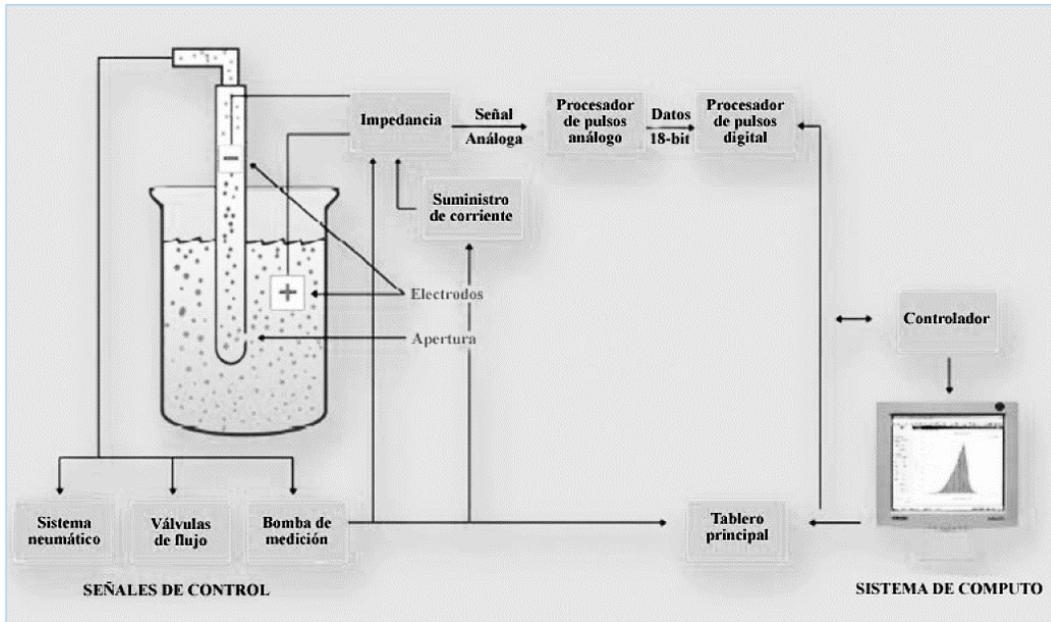


FIGURA 3 DIAGRAMA DEL FUNCIONAMIENTO DEL COULTER COUNTER

El análisis de tamaño de partícula puede ser desempeñado en un amplio intervalo de tamaños, para lograr esto, un número diferentes de sensores (tubos de apertura) es requerido. Los rangos de operación de cada sensor son de alrededor del 2% al 60% de 1 diámetro de apertura, así que para un tubo de apertura de 100  $\mu\text{m}$  el intervalo es de 2 a 60  $\mu\text{m}$ . Las partículas grandes dan cada vez más respuestas no lineales y tienden a bloquear la apertura si son mayores que alrededor de la mitad del diámetro de la apertura.

Entre los equipos comerciales se encuentran los presentados en la tabla 2, así como el intervalo de tamaño en el que trabajan, en el caso particular, este estudio utilizó un Beckman Coulter Multisizer 3.

TABLA 2 EQUIPOS DE ANÁLISIS QUE UTILIZAN EL PRINCIPIO DE COULTER

EQUIPOS	INTERVALOS DE TAMAÑOS
Beckman Coulter Z1	1 $\mu\text{m}$ a 120 $\mu\text{m}$
Beckman Coulter Z2	1 $\mu\text{m}$ a 120 $\mu\text{m}$
Beckman Coulter Multisizer 3	0.4 $\mu\text{m}$ a 1200 $\mu\text{m}$
Malvern Sysmex SD-2000	1 $\mu\text{m}$ a 120 $\mu\text{m}$
Malvern Sysmex CDA 500	1 $\mu\text{m}$ a 60 $\mu\text{m}$
Micromeretics Elzone 5370	12 $\mu\text{m}$ a 1900 $\mu\text{m}$
Micromeretics Elzone 5382	10 $\mu\text{m}$ a 1900 $\mu\text{m}$

### 2.1.5 NORMATIVIDAD

El Estado mexicano ha creado un marco jurídico que se encarga del establecimiento de normas de calidad que regulan los estándares mínimos de la calidad del agua, en lo que se refiere al agua para uso y consumo humano, la Secretaría de Salud expidió la Norma Oficial Mexicana nombrada a continuación:

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización.

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización de agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional ya que su cumplimiento es de carácter obligatorio.

### 2.1.6 BARRERAS PARA LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA CAPTADA

Las barreras para la potabilización del agua de lluvia para el consumo humano son operaciones de tratamiento, conformadas principalmente por filtración, desinfección y la eliminación de contaminantes por medios físicos (OMS, 2006).

De acuerdo a lo antes mencionado este trabajo se enfocará en un tren de tratamiento de doble barrera conformado por un filtro de arena y un filtro de carbón activado, con tres posibles opciones de pulimento: un filtro KDF, un filtro de carbón activado con plata y una lámpara de luz ultravioleta. A continuación se presenta una descripción de cada barrera de acuerdo con OMS (2006) y Jeffrey (2006).

#### FILTRO DE ARENA

Las partículas pueden separarse del agua sin tratar mediante filtros rápidos por gravedad, horizontales, o a presión, o filtros lentos de arena. La filtración lenta en arena es, en esencia, un proceso biológico, mientras que los otros tipos de filtración son procesos físicos.

Los filtros a presión se utilizan a veces cuando es necesario mantener una carga de presión para evitar la necesidad de impulsar el agua al sistema mediante bombeo. El lecho de filtración se encierra en una carcasa cilíndrica. Pueden fabricarse filtros a presión pequeños, capaces de tratar hasta 15 m<sup>3</sup>/h, de plásticos reforzados con vidrio. Los filtros a presión más grandes, de hasta 4 m de diámetro, se hacen de acero con un recubrimiento especial. El flujo se hace pasar a través de un material poroso, para este tipo de filtración comúnmente se usa arena como medio de filtración con un tamaño efectivo de 0.4 a 1.3 mm.

La principal función de estos filtros es la reducción de la turbiedad, remoción de sólidos presentes en el agua, sin embargo estos no remueven microorganismos.

La limpieza de los filtros rápidos se realiza mediante el lavado por corriente de agua limpia en sentido contrario del flujo de tratamiento.

#### FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO

El carbón activado se produce mediante calentamiento controlado de material carbonoso, normalmente madera, carbón, cáscaras de coco o turba. Esta activación produce un material poroso con una gran superficie específica (de 500 a 1500 m<sup>2</sup>/g) y una afinidad alta por los compuestos orgánicos. Se utiliza para eliminar sabores y olores. Se utiliza normalmente en lechos fijos, ya sea en adsorbedores diseñados específicamente para la eliminación de sustancias químicas.

La vida útil de un lecho de carbón activado es función de la capacidad del carbón utilizado y del tiempo de contacto del agua con el carbón, llamado tiempo de contacto con el lecho vacío, que se controla mediante el caudal unitario de agua y que suele ser del orden de 5 a 30 minutos. La capacidad del carbón activado depende en gran medida de la fuente de agua y disminuye mucho si hay presencia de compuestos orgánicos en el agua. En la adsorción de una sustancia sobre carbón activado influye su solubilidad en agua.

El carbón activado se utiliza para eliminar del agua plaguicidas y otras sustancias orgánicas, compuestos que producen sabores y olores, cianotoxinas y carbono orgánico total.

#### FILTRO DE CARBÓN CON PLATA

Estos filtros están compuestos por carbón activado impregnados de plata, tiene la principal función de inhibir el desarrollo bacteriano en su superficie y proveen una excelente protección antimicrobiana en el filtro de carbón activado.

La plata ha comprobado ser el medio más efectivo para proteger los filtros de carbón activado contra la contaminación bacteriana, ya que sueltan iones de plata de una manera controlada, proporcionando protección antimicrobiana a lo largo de la vida asignada al filtro.

Con el objeto de cumplir con las normas de agua potable, es importante que la plata impregnada en carbón activado se encuentre suficientemente bien ligada a éste, para evitar su desprendimiento hacia el agua. Dicho desprendimiento, además de provocar el incumplimiento de la norma, significa que el carbón perderá su protección en menor tiempo. Existen tres métodos para la fijación de este metal: del de plata coloidal, el químico y el electroquímico. De los tres métodos antes mencionados el primero no es recomendable ya que existe desprendimiento

de la plata, en el segundo método existe una pequeña porción de desprendimiento del metal, por lo que el tercer método es el más recomendado ya que por medio de este se logra una mejor fijación del metal-carbón.

FILTRO KDF

Los filtros de degradación cinética del flujo (KDF, por sus siglas en inglés *Kinetic Degradation Fluxion*) está compuesto de gránulos de gran pureza de cobre-zinc que reducen los contaminantes del agua usando reacciones oxidación/reducción (redox). El medio del KDF intercambia electrones con los contaminantes, para reducirlos a componentes no dañinos. Durante las reacciones, los electrones son transferidos entre las moléculas y se crean nuevos elementos.

Tiene la función de remover del agua hierro, ácido sulfhídrico y metales pesados como el mercurio, plomo, cromo, entre otros, controla y no permite la reproducción de microorganismos.

RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

La desinfección del agua por medio de radiación ultravioleta (UV) es un procedimiento físico, que no altera su composición. El uso de la radiación UV para el tratamiento de agua potable se ha restringido normalmente a instalaciones pequeñas. La radiación UV, emitida por una lámpara de arco de mercurio de baja presión, tiene actividad bacteriosida a longitudes de onda de 180 a 320 nm. Puede utilizarse para inactivar protozoos, bacterias, bacteriófagos, levaduras, virus, hongos y algas. La turbidez del agua puede inhibir su desinfección mediante radiación UV.

En la tabla 3 se presentan algunas ventajas y desventajas de las barreras antes descritas.

TABLA 3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS QUE PRESENTAN LAS BARRERAS SELECCIONADAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

BARRERA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
FILTRO DE ARENA	Disminución de la turbiedad por lo que facilita la desinfección.	Necesita de retrolavado constante, buen lavado del material de filtrado para evitar contaminación.
FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO	Remoción de cloro residual, olor , color y sabor	Problemas con la contaminación bacteriana debido a que es un excelente medio para el crecimiento de esta.



## 2.2 SITIO DE ESTUDIO

### 2.2.1 LOCALIZACIÓN

La Academia Mexicana de Ciencias se localiza en la Calle Cipreses s/n, en la Colonia San Andrés Totoltepec de la Delegación Tlalpan en la Ciudad de México, México.

La Academia Mexicana de ciencias tiene las siguientes coordenadas geográficas:

Latitud: 19° 14' 30.92" N y Longitud: 99° 10' 26.42" O

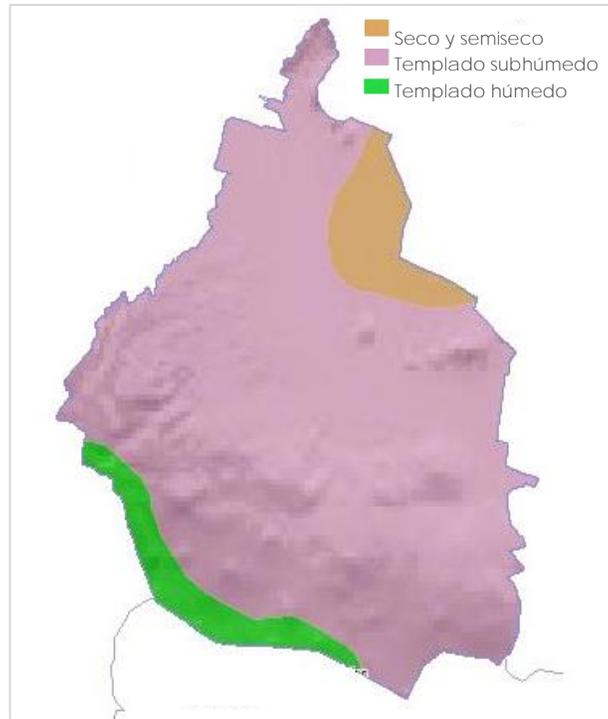
En el mapa 1 se muestra el mapa de la Ciudad de México en donde se ubica la AMC de acuerdo a las coordenadas antes mencionadas.



MAPA 1 LOCALIZACIÓN DE LA AMC. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

### 2.2.2 CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS

De acuerdo con García de Miranda (1988) en el país existen una gran variedad de climas, los cuales, de manera muy general pueden clasificarse según su temperatura, en cálido, templado y frío; y de acuerdo con la humedad existente en el medio, en húmedo, subhúmedo y seco. De acuerdo con INEGI, el 87% del territorio de la Ciudad de México presenta clima templado subhúmedo, el 7% seco y semiseco y el restante 6% templado húmedo. En el mapa 2 se representan los porcentajes antes mencionados.



MAPA 2 CLIMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO POR REGIONES. FUENTE: INEGI, 2010.

De acuerdo con el mapa anterior la Academia Mexicana de Ciencias se encuentra localizada en la región donde corresponde un clima templado subhúmedo.

La temperatura media anual es de 11.3 °C, la temperatura mínima es alrededor de 2.8 °C que se presenta en el mes de enero y la máxima se presenta en abril que en promedio es de 19.3 °C.

La lluvia se presenta en verano, en los meses de junio a septiembre, con un número de días con lluvia de 125.5, la precipitación media es de 1129.8 mm anuales, la evaporación total anual es de 1405.2 mm; de acuerdo con la estación meteorológica del servicio meteorológico nacional, 9002 Ajusco, con datos del periodo 1951-2010, que se encontraba operando a aproximadamente kilómetros de la Academia.



## CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

### 3.1 PUNTOS DE MUESTREO

En la Academia Mexicana de Ciencias, se cuenta con un sistema de captación de agua de lluvia, por ello, se estableció el punto de muestreo en el reservorio del auditorio "Galileo Galilei" de la AMC ya que este está destinado para el almacenamiento del agua de lluvia captada en dicha edificación.

En la figura 4 se muestra la ubicación del auditorio, con las coordenadas geográficas: latitud  $19^{\circ} 14' 25.11''$  N y longitud  $99^{\circ} 10' 24.59''$  O, en donde se encuentra el sitio de muestreo seleccionado, en el cual se seleccionaron dos puntos de muestreo nombrados "Fondo" y "Superficie". Se nombraron a los puntos de muestreo de la manera anterior debido a la posición de las mismas en el depósito, ya que se requería conocer la calidad del agua en dos diferentes puntos del mismo.



FIGURA 4 UBICACIÓN DEL SITIO DE MUESTREO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

### 3.2 MUESTREO

La realización del muestreo se llevó a cabo de acuerdo con la NOM-014-SSA1-1993 "Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados", principalmente en su apartado donde indica el procedimiento para la toma de muestra en captación de un cuerpo de agua superficial o tanque de almacenamiento.

Debido a que no existe una normatividad donde se indique la frecuencia con la que se debe realizar el muestreo en el reservorio para el agua de lluvia se decidió llevar a cabo un muestreo semanal para los puntos de muestreo “Fondo” y “Superficie” que comprendió del 19 de mayo del 2016 al 17 enero del 2017.

Se realizaron entonces, 26 muestreos, dando un total de 52 muestras (26 para Fondo y 26 para Superficie).

En la figura 5 se muestra el reservorio de aproximadamente 42 m<sup>3</sup>, punto en el cual se muestreo.



FIGURA 5 RESERVORIO UBICADO EN EL INTERIOR DEL AUDITORIO

### 3.3 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA CAPTADA

La caracterización del agua de lluvia captada estuvo encaminada a determinar: a) las características físicas, químicas y biológicas del agua y las concentraciones de los constituyentes de la misma, y b) los medios óptimos para reducir las concentraciones de contaminantes (Metcalf y Eddy, 1996).

Para la caracterización del agua de lluvia captada las muestras eran transportadas al Laboratorio de Ingeniería Ambiental (LIA) en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, en el cual se midieron por triplicado los siguientes parámetros de calidad para cada muestra:

- pH
- Turbiedad
- Color aparente y verdadero
- Sólidos suspendidos totales (SST)
- Sólidos disueltos totales (SDT)
- Dureza (Total y al Calcio)
- Alcalinidad
- Carbono orgánico total (COT)
- Demanda química de oxígeno (DQO)
- Abs UV

La determinación del pH se realizó mediante el potenciómetro de la marca OAKTON PC 450 que se muestra en la figura 6.



FIGURA 6 POTENCIÓMETRO UTILIZADO PARA LA MEDICIÓN DEL PH

La determinación de la turbiedad se realizó con el turbidímetro de la marca HACH 2100N que se muestra en la figura 7.

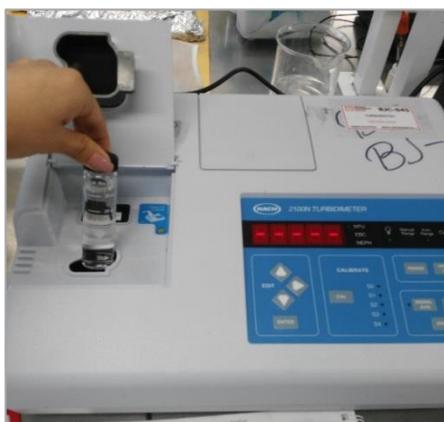


FIGURA 7 TURBIDÍMETRO HACH

La absorbancia UV (Abs UV) se midió por medio del espectrofotómetro DR 5000, de la marca HACH a una longitud de onda de 254 nm, por medio de una celda de cuarzo como se muestra en la figura 8.

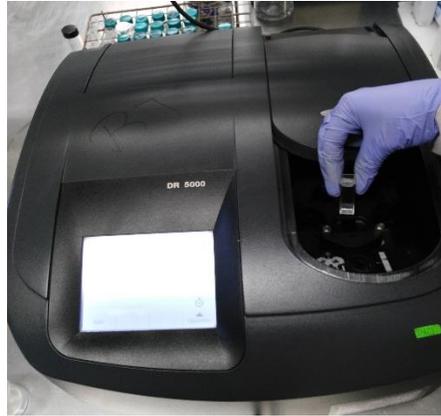


FIGURA 8 ESPECTROFOTÓMETRO DR 5000, HACH

La determinación del color verdadero y aparente se realizó por medio del método estándar de Platino-Cobalto 8025 (HACH, 2003).

Tanto los sólidos suspendidos totales como los sólidos disueltos totales se determinaron de acuerdo con lo establecido en la Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001.

La determinación de la dureza total y la dureza de calcio se realizó mediante el método volumétrico de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-072-SCFI-2001 y al Método 3500 y 3500 (Ca) establecido en el manual *Standard Methods for the Examination of water and wastewater*, (APHA, 1998). La dureza debida al magnesio se calculó a partir de la diferencia entre la dureza total y la dureza de calcio.

La alcalinidad se determinó por el método volumétrico de acuerdo a la Norma Mexicana NMX-AA-036-SCFI-2001 y al Método 2320 del manual *Standard Methods for the Examination of water and wastewater*, (APHA, 1998).

Los parámetros de COT y DQO se determinaron por medio del método directo 10128 y el método de digestión 8000, respectivamente, de acuerdo con el *Water Analysis Handbook*, (HACH , 2003).

La determinación del tamaño de partícula se realizó por medio del equipo Multisizer 3 *Coulter Counter* de la marca Beckman Coulter utilizando el método de la zona de detección eléctrica (ESZM por sus siglas en inglés *Electrical Sensing Zone Method*). Las corridas se realizaron con las aperturas de 30 y 100  $\mu\text{m}$  de diámetro nominal, las cuales tienen un intervalo de medición de 0.6 a 18  $\mu\text{m}$  y de 2 a 60  $\mu\text{m}$  respectivamente. Las muestras de fondo y superficie se corrieron por triplicado con ambas aperturas.

Para poder realizar las mediciones fue necesario preparar la muestra en recipientes Accuvettes de 20 mL con 10 mL de la muestra y 10 mL de solución isotónica con una concentración del 0.9 %.

Dependiendo de la apertura a utilizar las muestras tenían que ser previamente filtradas con un tamaño de poro adecuado, para el caso de la apertura de 30  $\mu\text{m}$  se utilizó un filtro con tamaño de poro de 20  $\mu\text{m}$  y para la apertura de 100  $\mu\text{m}$  un filtro de 60  $\mu\text{m}$  para así evitar que la apertura se obstruyera. En la figura 9 se muestran a grandes rasgos los pasos que se siguieron para la medición de este parámetro.



FIGURA 9 PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA

Para más detalle de los procedimientos utilizados en la caracterización del agua consultar el Anexo 1.

### 3.4 PLANTA PILOTO PARA LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA CAPTADA

#### 3.4.1 INSTALACIÓN DE LA PLANTA POTABILIZADORA

La planta de potabilización se colocó en el LIA del Instituto de Ingeniería. Se utilizó una base, en la cual se colocaron soportes para cada una de las barreras utilizadas en el tratamiento, como se observa en la figura 10.



FIGURA 10 INSTALACIÓN DE LA PLANTA PILOTO

Ya instalados los soportes se colocaron las 5 barreras, para el FA fue necesario lavar la grava y la arena con agua destilada para evitar contaminación en el sistema, debido a que estas presentaban impurezas. Una vez que se lavaron ambos materiales filtrantes se llenó el filtro rellenable con dichos materiales con las proporciones recomendadas por el fabricante, 25% de grava, 60% de arena y 15% de espacio libre para la expansión del material.

En la figura 11 se muestra tanto el lavado de uno de los materiales como el cartucho rellenable con y sin material filtrante.



FIGURA 11 PREPARACIÓN DEL MATERIAL Y LLENADO DE FILTRO DE ARENA

La planta potabilizadora está conformada por 5 barreras, un filtro de arena (FA), un filtro de carbón activado (CA), filtro de carbón con plata (PC), un cartucho de KDF y una lámpara de luz ultravioleta (UV). En la tabla 5 se muestran las características principales de las 5 barreras antes mencionadas.

TABLA 5 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS BARRERAS SELECCIONADAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

BARRERA	CARACTERÍSTICAS
FA	Cartucho rellenable de 2.5" x10", de flujo ascendente de un solo medio filtrante (arena). Distribución del material en el filtro: grava 25%, arena 60% y 15% de espacio para la expansión del material.
CA	Cartucho de carbón activado en bloque de 2.5" x 10" de 10 µm.
PC	Cartucho de carbón impregnado de plata de 2.2" x 10" de 0.5 µm.
KDF	Cartucho de KDF bacteriostático de aleación de cobre con zinc.
UV	Lámpara UV Polaris de acero inoxidable 304 modelo UVA-1C de 3.78 L/min con un consumo de energía de 10 W.

El tren de tratamiento está compuesto por una doble barrera (FA y CA) con tres posibles opciones de pulimiento que trabajaron en forma paralela (PC, KDF y UV), las cuales serán evaluadas y comparadas para posteriormente poder concluir cual es la más adecuada para el proceso de potabilización para nuestro caso.

En la figura 12 se muestra el diagrama de la planta potabilizadora piloto en el cual una muestra del agua de lluvia captada (superficie) fue enviada, por medio de una bomba peristáltica hacia el filtro de arena, seguido del CA, el efluente producido se distribuyó de manera paralela en cada una de las 3 opciones de pulimiento propuestas (PC, KDF y UV).

Se establecieron los puntos de muestreo en la salida de cada barrera para así poder evaluar la calidad del agua en cada etapa del tratamiento, estos se nombraron de la misma manera que la barrera a la que pertenecen.

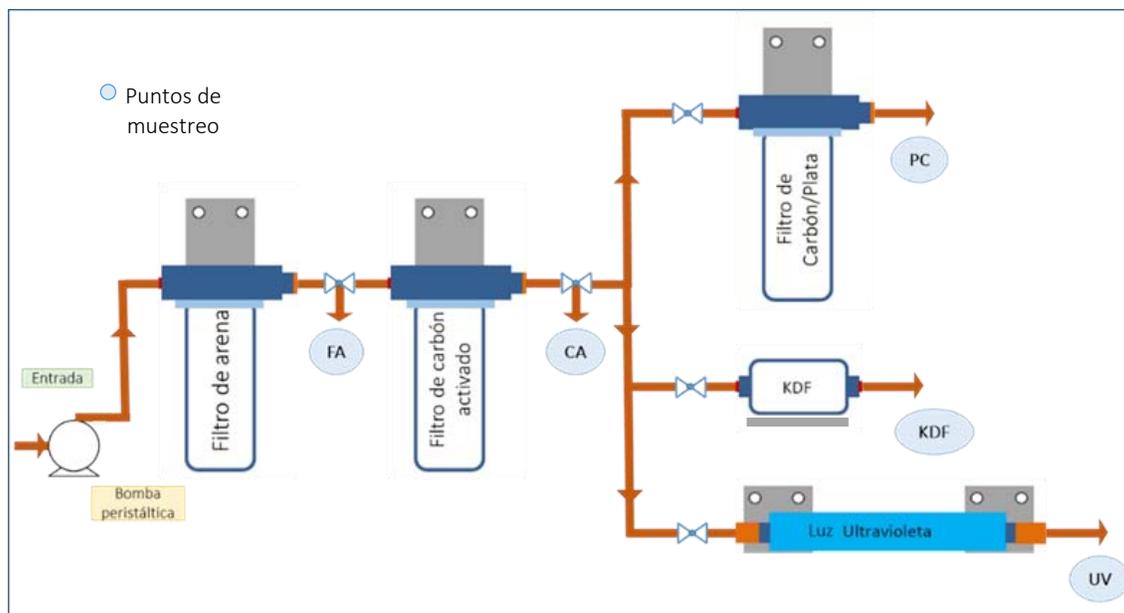


FIGURA 12 DIAGRAMA GENERAL DE LA PLANTA POTABILIZADORA PILOTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

En la figura 13 se muestra el resultado final de la instalación de la planta piloto conformada por las cinco barreras y la bomba peristáltica con el controlador de velocidad.



FIGURA 13 PLANTA PILOTO PARA LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA CAPTADA EN LA AMC

## 3.4.2 OPERACIÓN DE LA PLANTA

A partir del 20 de octubre del 2016 adicionalmente a la toma de muestra de los dos puntos seleccionados “Fondo” y “Superficie” se tomaron 3 muestras de este último punto en garrafones de 20 L para la operación de la planta potabilizadora.

La planta se operó un total de 17 horas y comprendió el periodo entre el 20 de Octubre del 2016 al 17 de enero del 2017 dando un tiempo de operación total de 39 días durante 8 semanas tratando diariamente cerca de 9 L en total. Previo a la puesta en operación se realizó un lavado con agua destilada para remover posibles impurezas en los filtros. Para cada día de operación en cada barrera se calculó el gasto por medio del volumen y medición del tiempo como se observa en la figura 14.



FIGURA 14 MEDICIÓN DEL GASTO DE LA BARRERA KDF

Se registró el tiempo de operación (inicio y fin de la corrida) y se calculó el volumen filtrado diario, el acumulado y el total por cada barrera a partir del tiempo de operación y el gasto. En la tabla 6 se muestran los datos de operación para el día 18 de noviembre del 2016 a manera de ejemplo.

TABLA 6 DATOS DE OPERACIÓN PARA EL DÍA 18/11/2016

DATOS DE OPERACIÓN: 20 DE OCTUBRE DEL 2016				
BARRERA	Q (L/min)	VOLUMEN FILTRADO (L)		
		CORRIDA ACTUAL	ACUMULADO	TOTAL
FA	0.53	7.95	167.51	175.46
CA	0.53	7.95	165.11	173.06
PC	0.19	2.85	53.88	56.73
KDF	0.18	2.70	54.84	57.54
UV	0.16	2.40	50.27	52.67
INICIO: 10:07 h – Fin: 10:22 h				

### 3.4.3 TOMA DE MUESTRAS Y CARACTERIZACIÓN DEL AGUA

Durante las 8 semanas de operación de la planta se realizaron 8 muestreos, el día del muestreo se corría la planta y se tomaban muestras para su caracterización, la muestra de agua sobrante era almacenada en la cámara fría del LIA a una temperatura de 4°C para su uso posterior en la planta el resto de la semana.

Se tomó una muestra en cada punto de muestreo en recipientes de 1L, dando un total de 40 muestras. En la figura 15 se muestra la toma de la muestra en cada punto de muestreo.

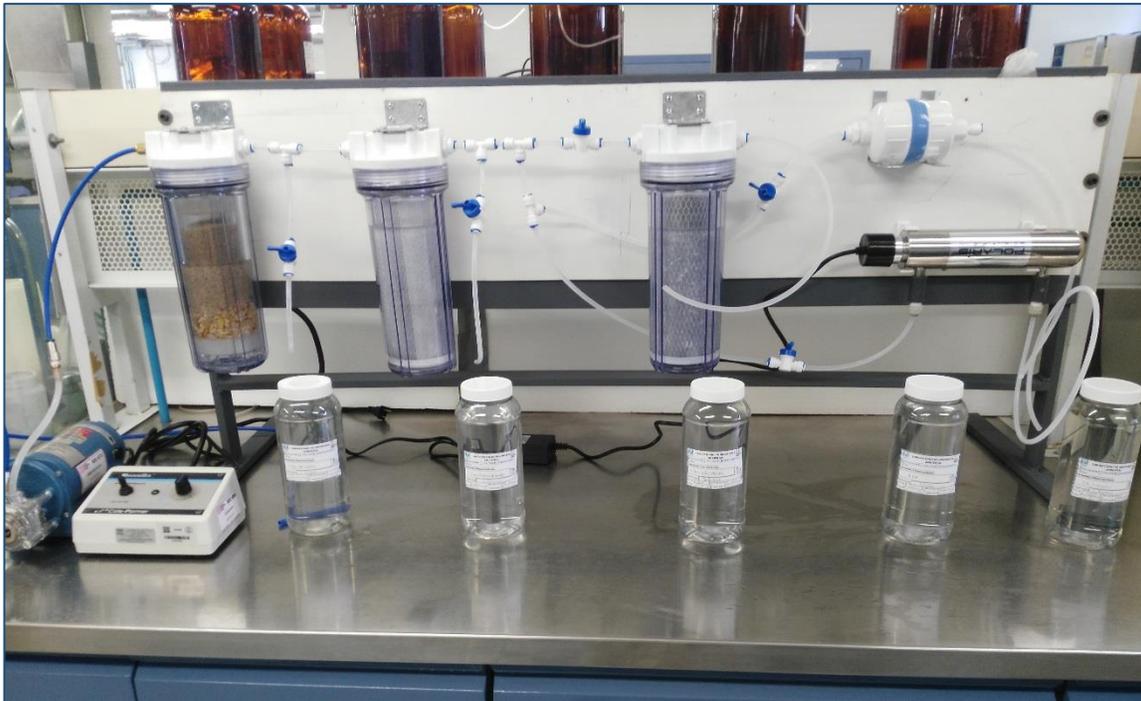


FIGURA 15 TOMA DE MUESTRAS EN CADA PUNTO DE MUESTREO DE LA PLANTA PILOTO

Para la caracterización del agua de la planta potabilizadora de igual manera que para el agua de lluvia captada sin tratamiento midieron por triplicado los siguientes parámetros de calidad para cada muestra:

- pH
- Turbiedad
- Color verdadero
- Sólidos disueltos totales (SDT)
- Dureza
- Alcalinidad
- Abs UV
- Carbono orgánico total (COT)
- Demanda química de oxígeno (DQO)
- Tamaño de partícula (apertura 30  $\mu\text{m}$ )

Adicionalmente a los parámetros antes mencionados, también se realizó el análisis de los parámetros biológicos coliformes totales y coliformes fecales por medio del método SimPlate® el cual está formado por medios de cultivo específicos y una placa especial. Para la toma de esta muestra se realizó en bolsas de plástico estéril de 100 mL con pastillas de tiosulfato como se muestra en la figura 16.



FIGURA 16 TOMA DE MUESTRA PARA EL PARÁMETRO DE CT Y CF

Para más detalle del procedimiento utilizado consultar el Anexo 1.

## CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA CAPTADA

Los resultados obtenidos en la caracterización del agua en los dos puntos seleccionados a partir de los métodos antes mencionados se muestran en las siguientes tablas, en las cuales se presenta el mínimo, máximo y la media para cada parámetro. La tabla 7 muestra los parámetros para el caso de "Fondo" y la tabla 8 muestra el caso para el punto de muestreo "Superficie".

TABLA 7 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA CAPTADA EN EL PUNTO "FONDO" (N=26 MUESTRAS)

PARÁMETROS	UNIDADES	MÁXIMO	MÍNIMO	MEDIA
pH	---	7.04	5.64	6.62
Turbiedad	UTN	11.50	1.61	5.31
Color aparente	Pt-Co	40.00	0.50	11.77
Color verdadero	Pt-Co	16.50	0.25	5.35
SST	mg/L	28.83	0.50	3.58
SDT	mg/L	134.44	15.56	52.74
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	70.06	10.00	29.26
Dureza al Calcio	mg CaCO <sub>3</sub> /L	30.00	10.00	18.48
Dureza al Magnesio	mg CaCO <sub>3</sub> /L	35.03	0.00	10.78
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /L	38.00	8.00	16.92
COT	mg/L	15.50	0.00	3.55
DQO	mg/L	12.25	0.75	4.94
Abs UV	cm <sup>-1</sup>	7.7	1.3	2.82

TABLA 8 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA CAPTADA EN EL PUNTO "SUPERFICIE" (N=26 MUESTRAS)

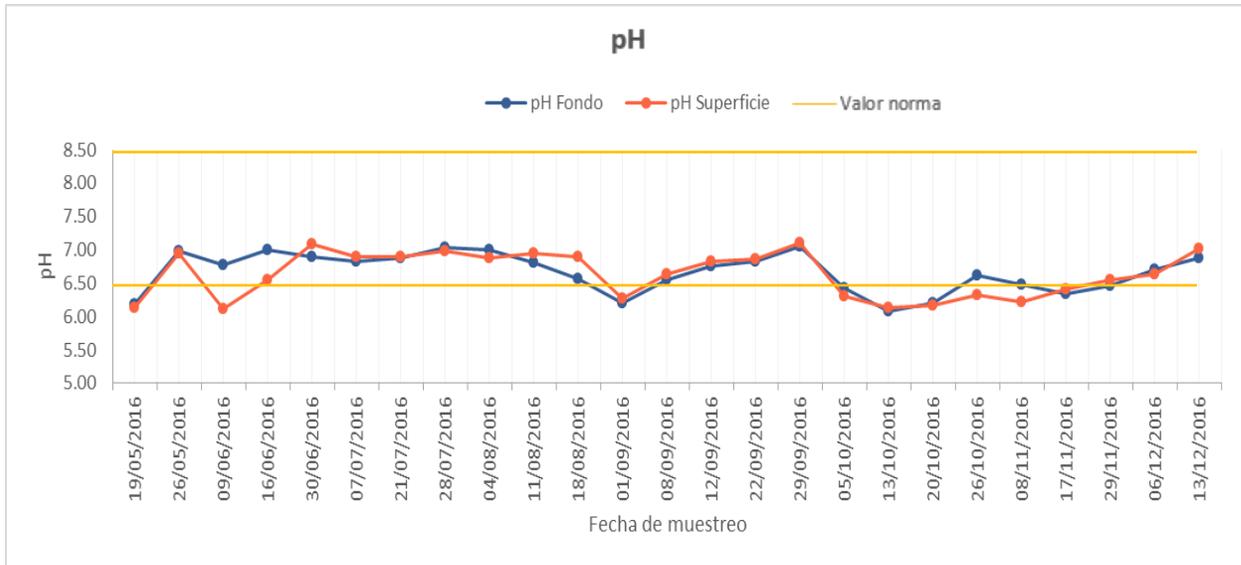
PARÁMETROS	UNIDADES	MÁXIMO	MÍNIMO	MEDIA
pH	---	7.10	5.50	6.58
Turbiedad	UTN	8.71	1.49	4.82
Color aparente	Pt-Co	49.50	0.50	10.84
Color verdadero	Pt-Co	10.00	0.25	4.02
SST	mg/L	9.20	0.50	1.88
SDT	mg/L	125.56	16.67	52.74
Dureza total	mg CaCO <sub>3</sub> /L	60.05	10.00	26.95
Dureza al Calcio	mg CaCO <sub>3</sub> /L	30.03	10.00	16.74
Dureza al Magnesio	mg CaCO <sub>3</sub> /L	40.03	0.00	10.20
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /L	38.00	6.00	15.19
COT	mg/L	10.00	0.00	2.83
DQO	mg/L	11.40	0.35	5.56
Abs UV	cm <sup>-1</sup>	6.35	1.45	2.61

La variabilidad que se obtuvo en los resultados de la calidad del agua previo a su proceso de potabilización fue diferente para cada parámetro medido, como se puede observar en el parámetro de pH para ambos casos su variabilidad es baja, pero en parámetros como la turbiedad y SDT se tiene una variabilidad alta, lo cual podría significar que la calidad del agua de lluvia captada varía a lo largo del periodo en el que se realizó el muestreo.

En las siguientes gráficas se muestran el tipo de variaciones que presentaron algunos de los parámetros medidos en la caracterización del agua de lluvia.

En la gráfica 1 se muestran los resultados obtenidos para el parámetro pH en donde se puede observar su baja variabilidad a lo largo del muestreo para ambos puntos de muestreo y donde se muestra con líneas en color amarillo los límites máximos permisibles que establece la NOM-127-SSA1-1994 para este parámetro.

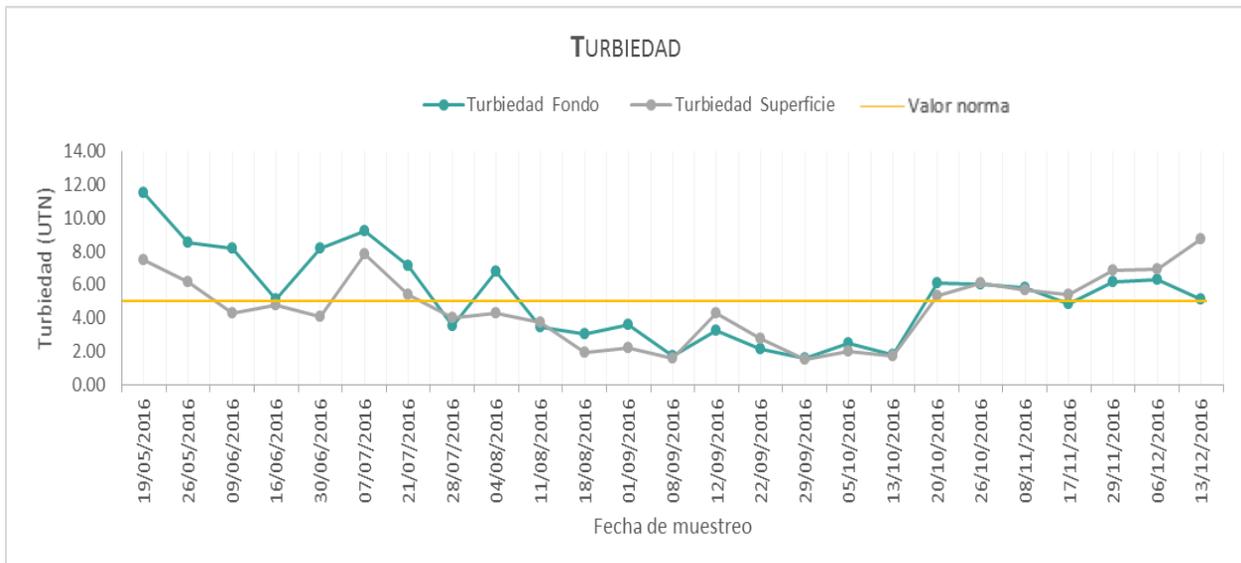
Para la mayoría de los casos este parámetro está dentro del intervalo establecido por la normatividad (6.5 a 8.5). Casos similares se presentaron en los parámetros dureza y alcalinidad.



GRÁFICA 1 RESULTADOS OBTENIDOS DE PH PARA AMBOS PUNTOS DE MUESTREO

En la gráfica 2 se muestran los valores para el parámetro de turbiedad donde se puede observar valores altos que no cumplen con la normatividad establecida (5 UTN) al inicio del muestreo, la disminución de estos valores en los meses de julio, agosto, septiembre y octubre y de nuevo un aumento para los últimos meses del muestreo.

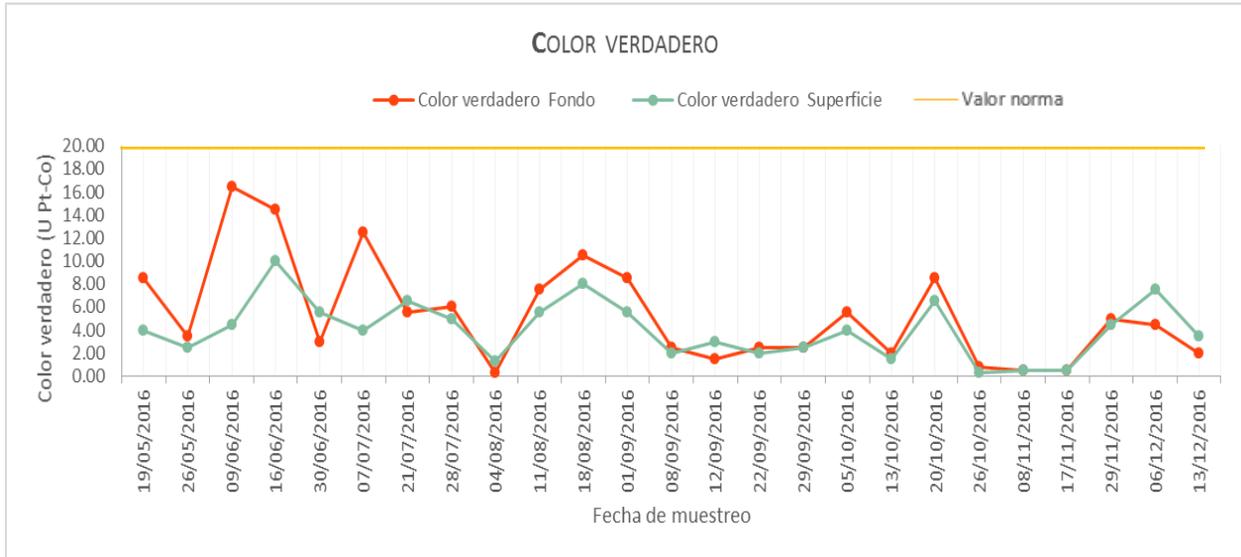
Los valores obtenidos para Fondo fueron mayores al inicio respecto al punto de muestreo Superficie, posteriormente los valores eran similares en ambos puntos y al final del muestreo el punto Superficie presentó valores superiores que el punto Fondo.



GRÁFICA 2 RESULTADOS OBTENIDOS DE TURBIEDAD PARA AMBOS PUNTOS DE MUESTREO

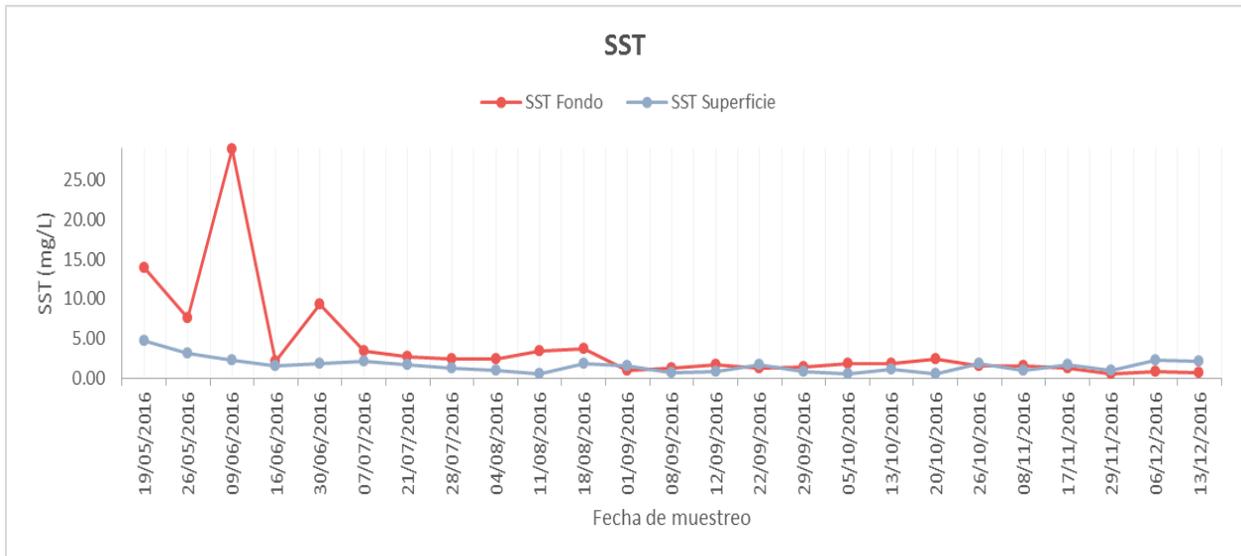
Los parámetros DQO, color verdadero y SDT presentaron una variabilidad similar ya que estos presentaron valores altos y bajos a lo largo del muestreo para ambos puntos, como se muestra en la gráfica 3 para el parámetro de color verdadero.

Para el caso de color verdadero y SDT todos los casos cumplen con el valor de 20 unidades en la escala de Pt-Co establecido en la normatividad.



GRÁFICA 3 RESULTADOS OBTENIDOS DE COLOR VERDADERO PARA AMBOS PUNTOS

Los parámetros color aparente, Abs UV, SST y COT presentaron una variabilidad similar, al inicio del muestreo estos presentaban valores altos y a lo largo del muestreo su valor fue disminuyendo. En la gráfica 4 se presentan los valores obtenidos de SST para ambos puntos de muestreo.



GRÁFICA 4 VALORES OBTENIDOS DE SST PARA AMBOS PUNTOS

De acuerdo a la gráfica 4 se puede observar que al inicio del muestreo hay una gran diferencia entre ambos puntos de muestreo siendo los valores de Fondo más altos, posteriormente los valores para ambos puntos disminuyen y se mantienen constantes. En la figura 17 se muestra dicha variabilidad en el parámetro SST para tres diferentes fechas de muestreo, en la parte superior se presentan las muestras del punto Fondo y en la parte inferior de Superficie (por triplicado para cada día para cada punto de muestreo).

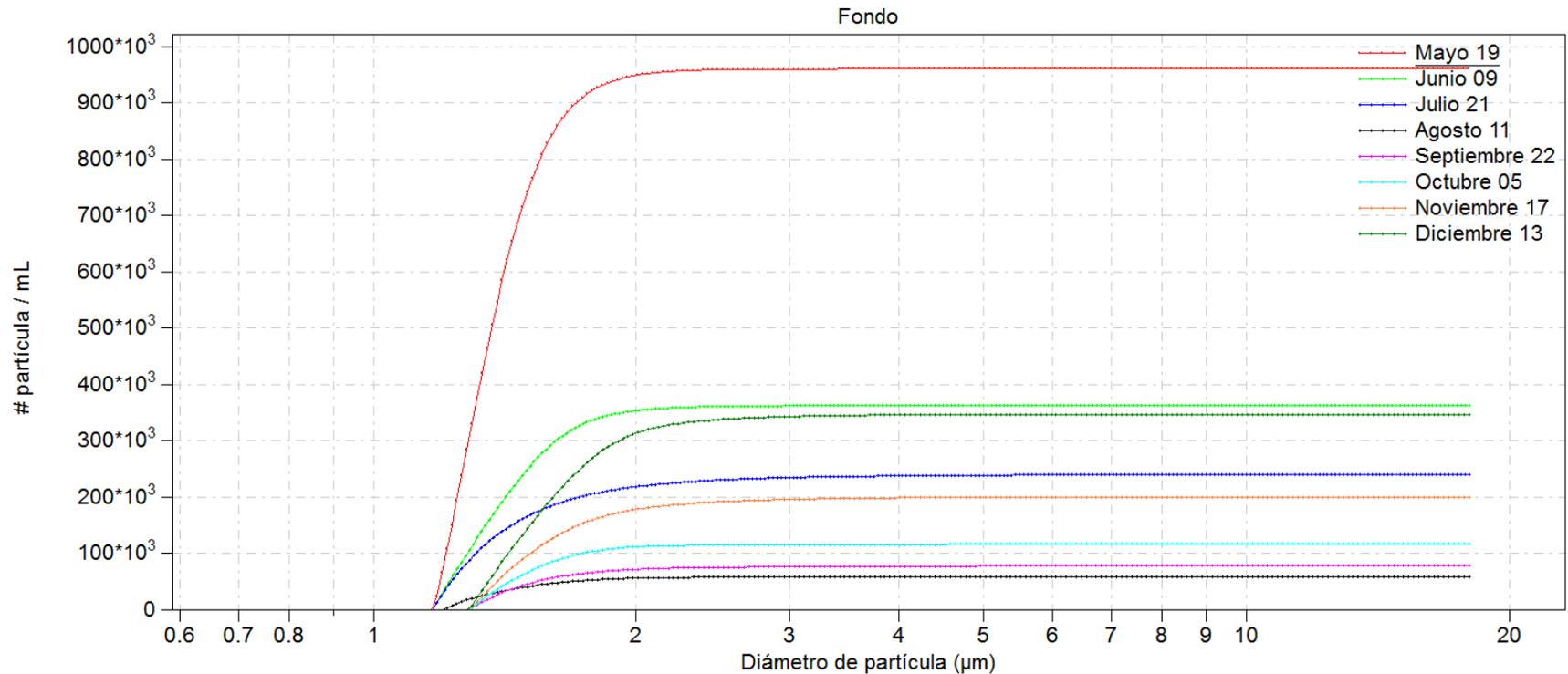


FIGURA 17 SST PARA TRES DIFERENTES FECHAS DE MUESTREO PARA AMBOS PUNTOS

Para más detalle de los resultados obtenidos en cada uno de los parámetros medios en la caracterización del agua de lluvia captada, consultar el Anexo 2.

Para el tamaño de partícula se calculó el promedio de las corridas que se realizaron por triplicado para cada día de muestreo, tanto para Fondo como para Superficie con la apertura de 30  $\mu\text{m}$  ya que a partir de las mediciones realizadas con la apertura de 100  $\mu\text{m}$  se concluyó que era el intervalo más adecuado para el tamaño de partículas encontradas en el agua de lluvia

En la gráfica 5 se muestran los resultados promedios obtenidos de la distribución del tamaño de partículas en el punto de muestreo Fondo, para un día de cada mes de muestreo a manera de ejemplo. Queda evidente, que el agua de lluvia contiene partículas inferiores a 5  $\mu\text{m}$  lo que le infiere que los microorganismos cuyo tamaño sea inferior a este puedan estar asociados a la misma y por ende estar presente en el agua de lluvia.

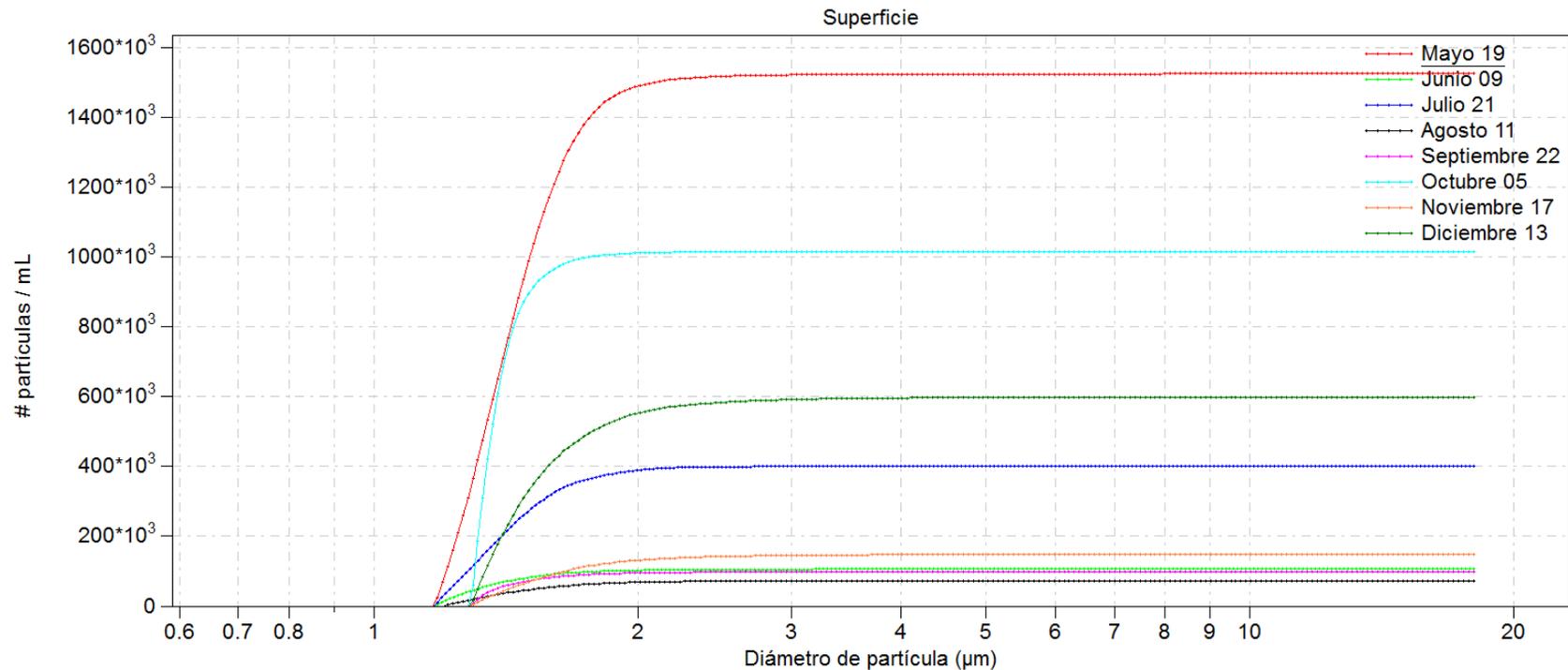


GRÁFICA 5 DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULA EN EL PUNTO DE MUESTREO "FONDO"

El número de partículas varió a lo largo del muestreo, como se puede observar al inicio del mismo se tiene un mayor número de partículas y este va disminuyendo hasta el mes de agosto, para el mes de septiembre el número de partículas comienza a incrementar hasta llegar al mes de diciembre, misma tendencia que se puede observar en el parámetro de turbiedad; así como la variación de la calidad del agua de lluvia captada durante el muestreo.

Para la muestra del día 19 de mayo se obtuvieron  $9.60 \times 10^5$  partículas /mL, en donde aproximadamente el 90% de estas partículas tiene un diámetro de  $1.20 \mu\text{m}$ , para el día 11 de agosto fueron de  $5.83 \times 10^4$  con un diámetro de partícula de  $1.22 \mu\text{m}$  y para el 13 de diciembre se tenían  $3.47 \times 10^5$  partículas /mL con un diámetro de  $1.33 \mu\text{m}$ .

En la gráfica 6 se muestran los resultados obtenidos para el punto de muestreo Superficie.



GRÁFICA 6 DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS EN EL PUNTO DE MUESTREO "SUPERFICIE"

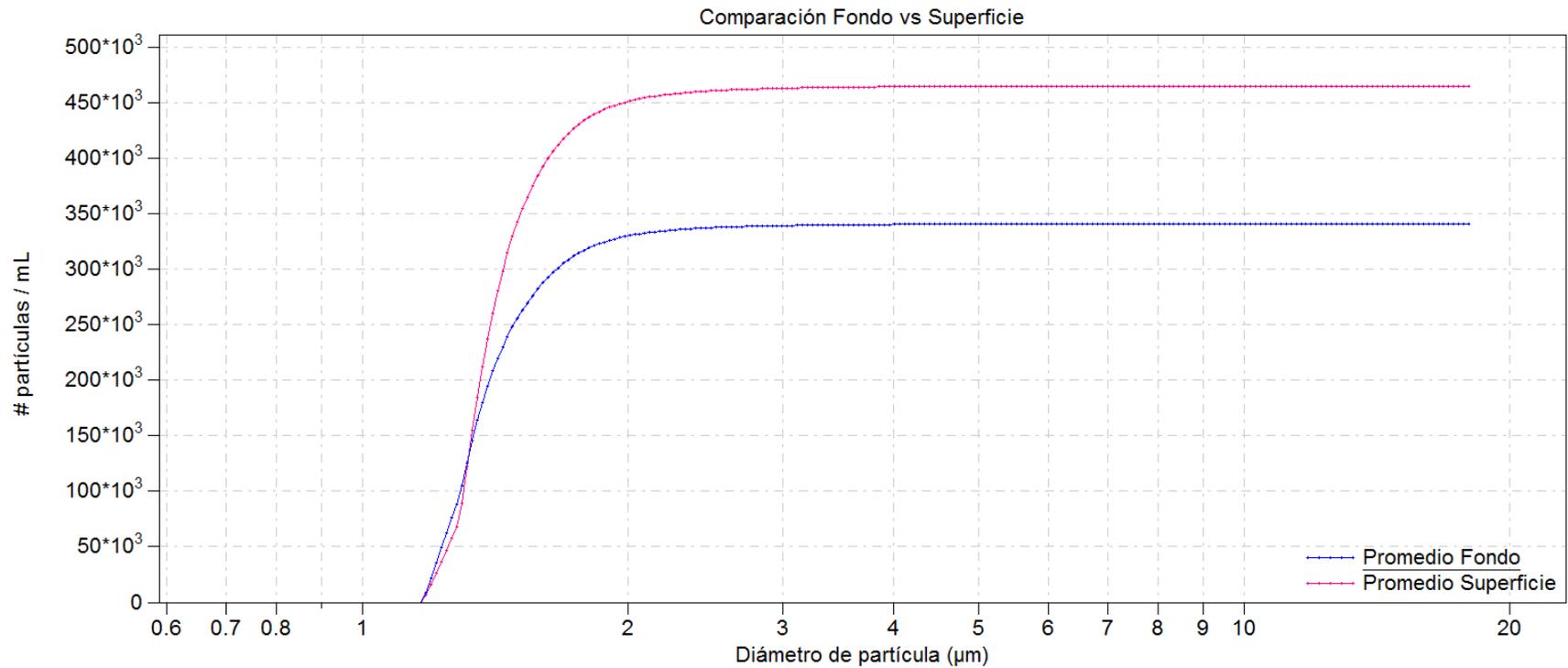
Para el punto de muestreo de superficie se encontró una mayor variabilidad durante la realización del muestreo en entre parámetro medido ya que si bien de igual manera al inicio es cuando se tiene un mayor número de partículas este no sigue la misma tendencia que el punto Fondo, se puede observar que a lo largo del muestreo el número de partículas incrementa y disminuye lo cual puede deberse a la sedimentación de partículas.

Para la muestra del día 19 de mayo se obtuvieron  $1.52 \times 10^6$  partículas /mL, en donde aproximadamente el 90% de estas partículas tiene un diámetro de  $1.22 \mu\text{m}$ , para el día 11 de agosto fueron de  $7.33 \times 10^4$  con un diámetro de partícula de  $1.23 \mu\text{m}$  y para el 13 de diciembre se tenían  $5.97 \times 10^5$  partículas /mL con un diámetro de  $1.31 \mu\text{m}$ .

En la gráfica 7 se muestran los resultados generales para ambos puntos de muestreo, donde se realizó el promedio de los valores obtenidos durante todo el muestreo para cada punto.

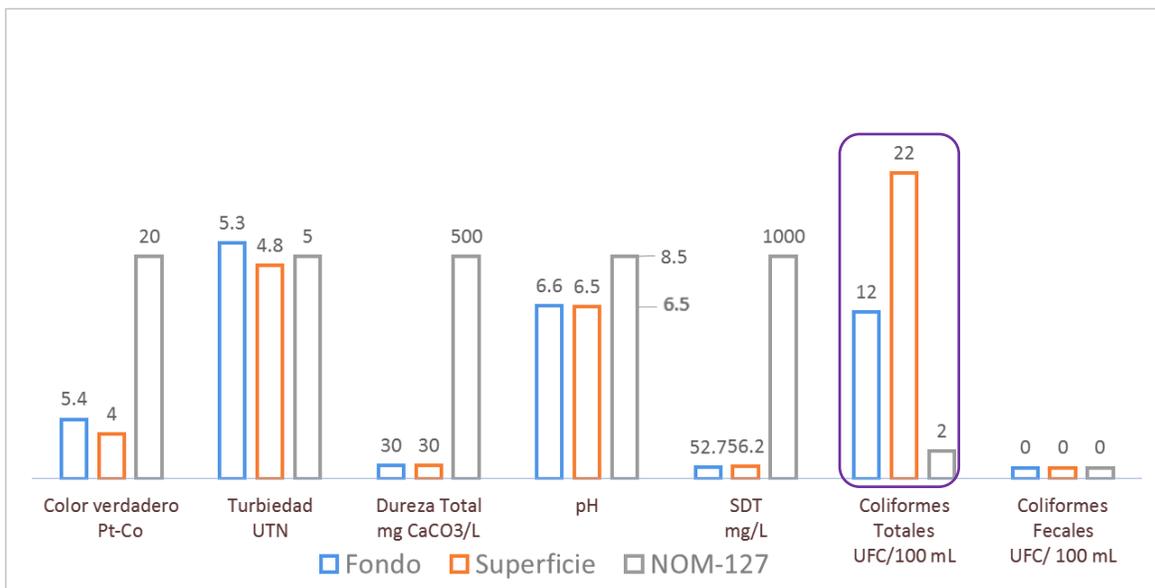
Por medio de esta gráfica se puede observar la diferencia entre ambos puntos de muestreo obteniendo se así un promedio de  $3.41 \times 10^5$  partículas /mL con un diámetro de  $1.21 \mu\text{m}$  para Fondo y  $4.65 \times 10^5$  partículas /mL con un diámetro de  $1.24 \mu\text{m}$  para superficie. Dicha diferencia entre ambos puntos es atribuida a la sedimentación propia de las partículas.

El tamaño de las partículas medidas para ambos casos y para la mayoría de los días de muestreo se encuentran en el mismo intervalo de tamaño.



GRÁFICA 7 DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS EN AMBOS PUNTOS DE MUESTREO

En la gráfica 8 se muestra la comparación de los dos puntos de muestreo con valores máximos permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 con relación al valor promedio obtenido en la caracterización del agua de lluvia captada.



GRÁFICA 8 COMPARACIÓN DE LOS VALORES MEDIOS OBTENIDOS CON RESPECTO A LA NORMATIVIDAD

En la gráfica 8 se observa que los valores promedio obtenidos en la caracterización del agua para ciertos parámetros como color verdadero, dureza total, pH, SDT y coliformes fecales en ambos puntos de muestreo cumplen los valores establecidos en la normatividad.

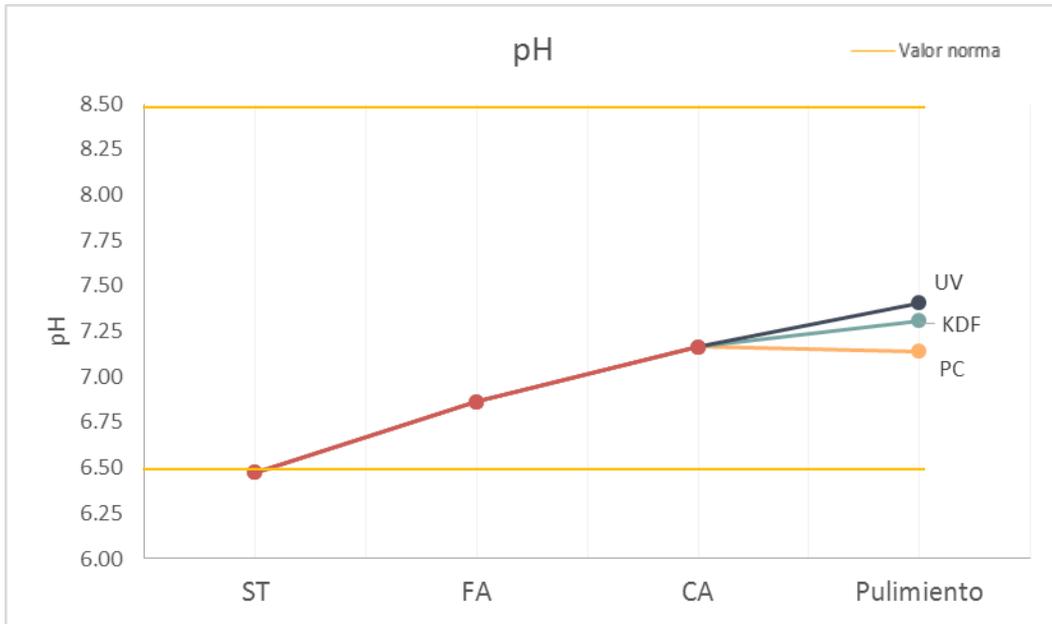
Sin embargo para ambos casos los valores obtenidos en el parámetro de coliformes totales, están muy por arriba de 2 UFC/100 mL, valor establecido en la normatividad vigente, por lo que es necesario implementar el sistema de potabilización.

Aunado a que la calidad el agua de lluvia captada varía en el tiempo, por lo que la potabilización es necesaria.

#### 4.2 PLANTA PILOTO, CARACTERIZACIÓN DEL AGUA EN CADA ETAPA

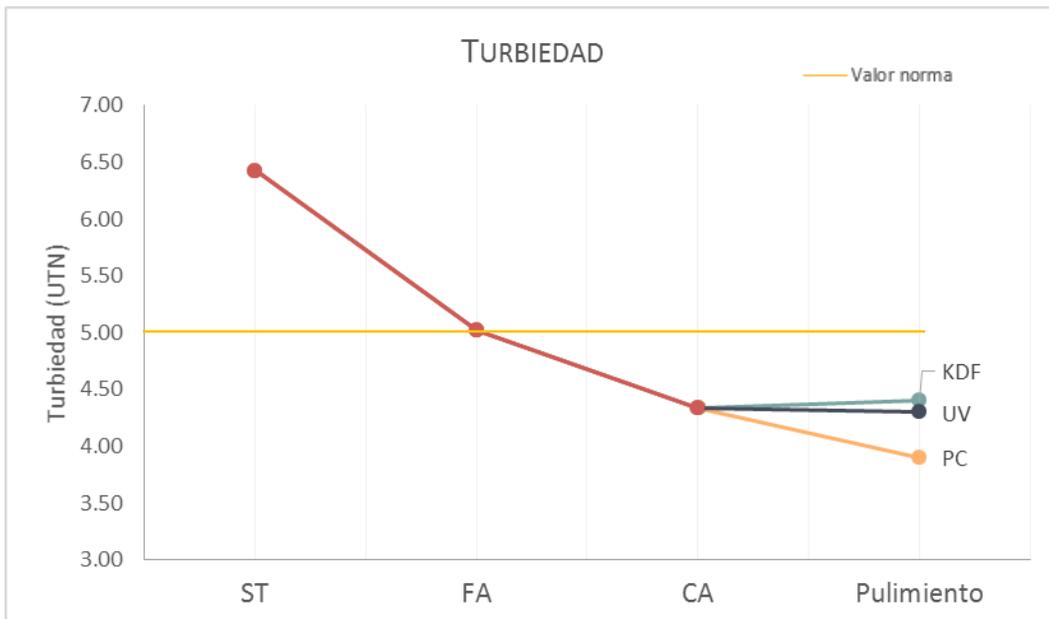
En las siguientes gráficas se muestran los resultados obtenidos para los parámetros medidos en la caracterización del agua para cada una de las barreas de la planta potabilizadora piloto así como en el agua de lluvia captada sin tratamiento (ST). Para cada parámetro se realizó el promedio de cada corrida en cada una de las barreras.

En la gráfica 9, 10, 11 y 12 se muestran los resultados obtenidos para los parámetros pH, turbiedad, color verdadero y COT en el tren de potabilización respectivamente.



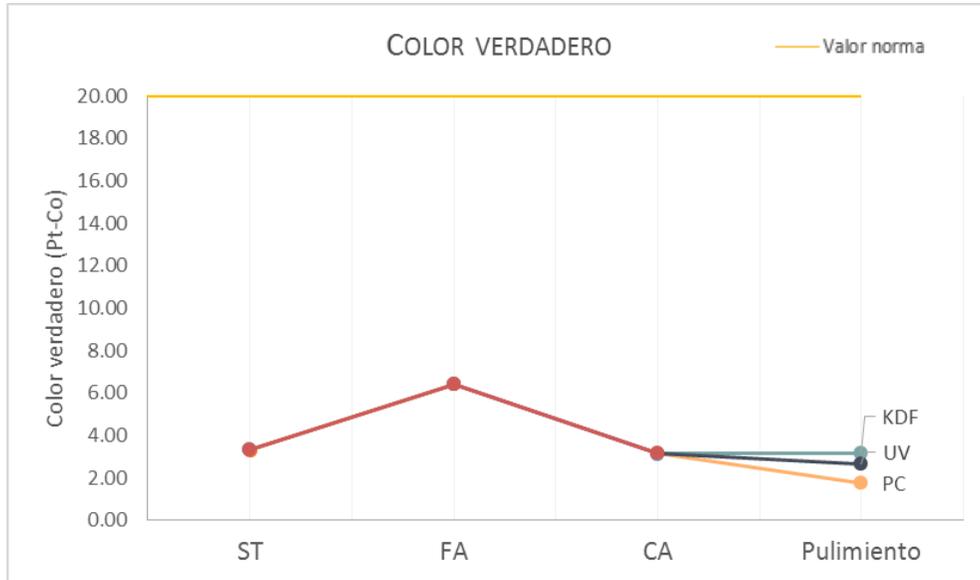
GRÁFICA 9 RESULTADOS DE pH EN LA PLANTA PILOTO

Los valores de pH aumentaron en cada una de las barreras hasta llegar a un intervalo de 7 a 7.5 para las tres barreras de pulimiento cumpliendo así con la normatividad.



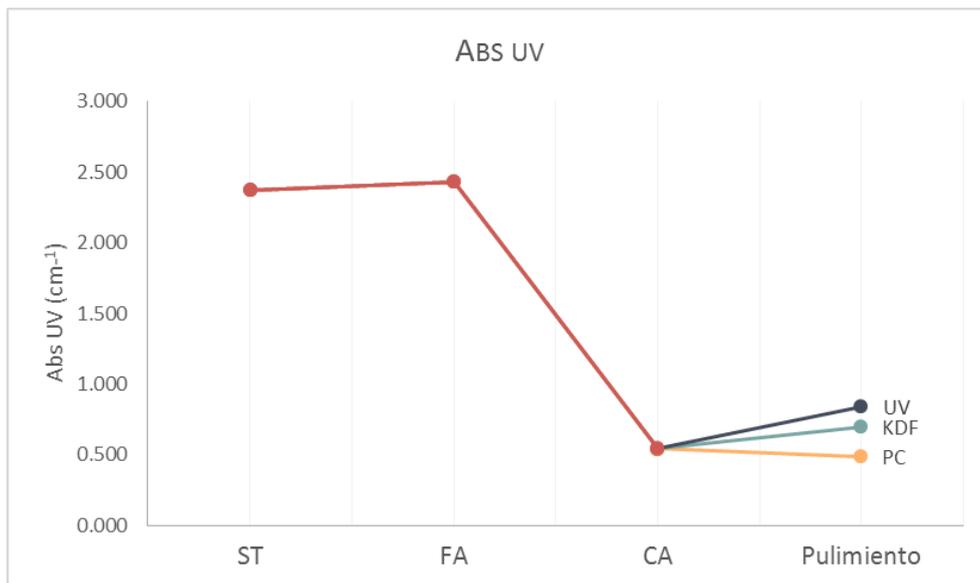
GRÁFICA 10 RESULTADOS DE TURBIEDAD OBTENIDOS EN LA PLANTA PILOTO

El valor promedio del agua sin tratamiento rebasa el límite máximo establecido en la normatividad, al pasar por el proceso de potabilización se puede notar una disminución en este valor para cada una de las barreras, siendo el valor más bajo en la barrera PC.



GRÁFICA 11 RESULTADOS DEL COLOR VERDADERO PARA LA PLANTA PILOTO

Para el color verdadero se puede observar un incremento de este en la barrera del filtro de arena (FA), lo cual nos podría indicar una posible contaminación en el filtro, también se puede observar que la barrera del carbón activado logra bajar el color adquirido en esta etapa previa. Los valores obtenidos en las demás barreras son menores que el valor de entrada sin embargo en la barrera PC la disminución es más notoria.



GRÁFICA 12 RESULTADOS OBTENIDOS DE ABS UV EN LA PLANTA PILOTO

Por medio de la Abs UV podemos observar que el FA no tiene una remoción significativa, mientras que el CA reduce el valor de esta significativamente.

En cuanto a las barreras de pulimiento todas logran reducir el valor de este parámetro, el cual puede relacionarse con la presencia de materia orgánica.

Para más detalle de los resultados obtenidos en cada uno de los parámetros medios en la caracterización del agua del proceso de potabilización, consultar el Anexo 2.

A continuación en la tabla 9 se muestran los resultados obtenidos en diferentes fechas del muestreo del parámetro microbiológico coliformes totales (CT) medidos en cada una de las barreras de la planta piloto de potabilización, así como del agua de entrada, ya que en ninguna de las muestras se detectaron coliformes fecales.

TABLA 9 RESULTADOS OBTENIDOS PARA CT EN LA PLANTA PILOTO

BARRERA	CT (UFC/100 mL)					
	26/10/2016	17/11/2016	29/11/2016	6/12/2016	13/12/2016	17/01/2017
ST	4	4	22	12	10	10
FA	0	16	0	4	10	8
CA	46	36	0	2	0	8
PC	6	0	0	0	0	0
KDF	0	2	0	0	0	2
UV	0	0	0	0	0	0

Como se puede observar en las barreras de FA y CA en los primeros días de operación de la planta se mostró un incremento del valor con respecto al valor de la entrada, por lo que el día 25 de noviembre se decidió realizar el lavado de la arena y grava de una manera más metódica y se cambió el cartucho del filtro de carbón activado (anterior de 10  $\mu\text{m}$ , nuevo de 5  $\mu\text{m}$ ) que este presentaba una posible contaminación. Al realizar las acciones antes mencionadas los resultados mejoraron significativamente como se muestra en la tabla 9.

En la figura 18 se muestran los resultados obtenidos de las pruebas microbiológicas para el día 29 de noviembre, en donde los pocillos de color rosa son positivos a CT y los de color azul negativos.

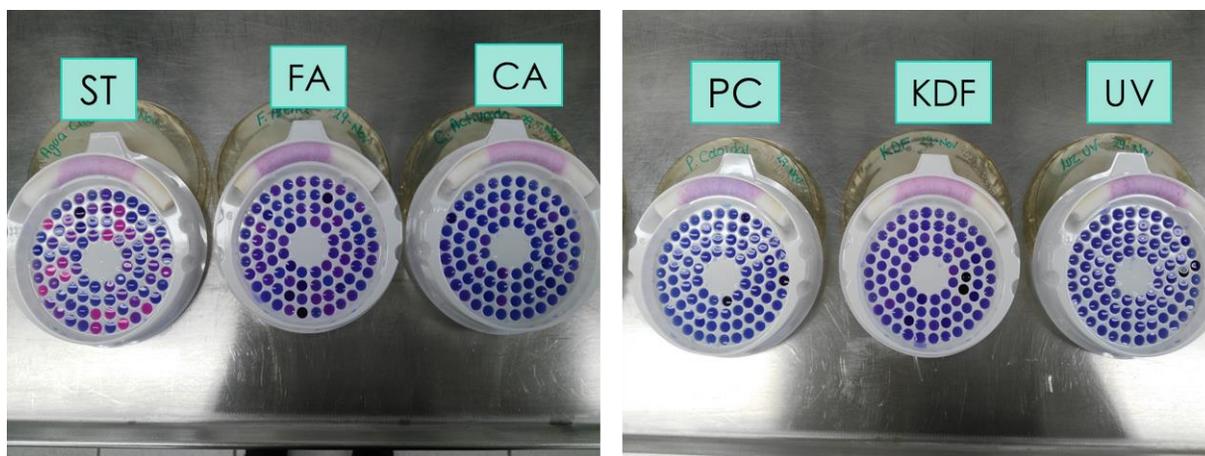


FIGURA 18 RESULTADOS DE CT POR MEDIO DEL MÉTODO SIMPLATE

### 4.3 COMPARACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS

Para poder realizar la comparación entre las tres barreras de pulimiento propuestas en el tren de potabilización del agua de lluvia captada se calculó el porcentaje de remoción de los parámetros medidos en la caracterización del agua.

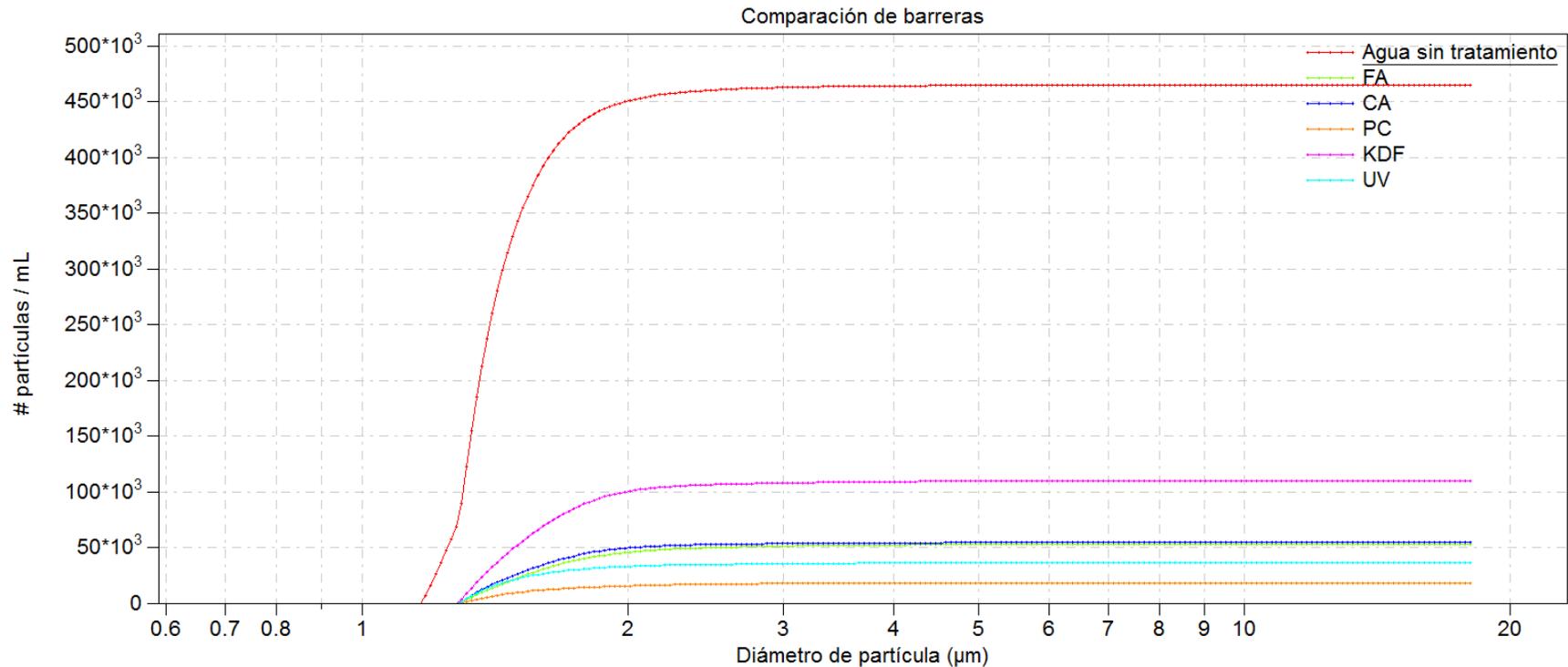
En la tabla 10 se muestran los principales resultados de algunos de los parámetros medidos.

PARÁMETRO	SIN TRATAMIENTO	% REMOCIÓN				
		FA	CA	PC	KDF	UV
TURBIEDAD (UTN)	6.43	22	33	39	31	33
COLOR VERDADERO (PT-Co)	3.2	0	2	44	2	17
COT (mg/L)	1.38	18	43	45	40	52
ABS UV (%)	0.024	0	77	80	67	65
DUREZA TOTAL (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	26.95	26	26	26	26	26
# PARTÍCULAS/ mL	4.65x10 <sup>5</sup>	88	88	96	76	92

De acuerdo con las eficiencias de remoción obtenidas tanto para los parámetros convencionales como para la distribución de partícula, de las tres barreras de

pulimiento propuestas las que arrojan mejores resultados para la mayoría de los parámetros son el PC y el UV.

En la gráfica 13 se muestra la comparación de cada barrera de la planta piloto de potabilización de acuerdo a su distribución de partículas.



GRÁFICA 13 COMPARACIÓN DE LAS BARRERAS DE ACUERDO A SU DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULA

La disminución en el número de partículas durante el proceso de potabilización es significativa, las barreras FA y CA tienen valores similares ( $5.30 \times 10^4$  y  $5.42 \times 10^4$  partículas /mL respectivamente), se observa que de igual manera que en los resultados obtenidos en los parámetros convencionales para la distribución de partícula las barreras PC y UV resultaron con mejores resultados respecto al KDF el cual muestra valores superiores ( $1.1 \times 10^5$  partículas /mL) respecto a los dos antes mencionadas (PC  $1.82 \times 10^4$  y UV  $3.62 \times 10^4$  partículas /mL). Sin embargo el que muestra mejores resultados es el PC. En cuanto al tamaño este sigue teniendo un diámetro promedio de  $1.2 \mu\text{m}$  para cada barrera.

## CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación se llegaron a las siguientes conclusiones:

- La calidad del agua de lluvia captada en la AMC presenta variabilidad con respecto al tiempo y con respecto al punto de muestreo en el reservorio, cumpliendo sólo con algunos de los valores establecidos por la norma por temporadas y sobrepasándolos en otros.
- De acuerdo con los resultados obtenidos en la caracterización del agua de lluvia esta es apta para su potabilización ya que la presencia de contaminantes en esta es relativamente baja, representando así una ventaja, por ejemplo, el valor de la dureza es bajo por lo que se puede reducir significativamente la cantidad de jabones y detergentes empleados para la limpieza.
- Debido a la variabilidad de la calidad del agua de lluvia es necesario implementar un proceso de potabilización por medio del cual se cumplan todos los valores establecidos en la normatividad para un uso potable.
- A partir de la comparación de las tres barreras de pulimento se concluye que la barrera con mejor desempeño para nuestro caso de estudio fue la barrera de carbón activado con plata, sin embargo con la lámpara de UV también se obtuvieron buenos resultados, dejando de fuera al KDF.
- El parámetro de distribución de partícula arroja buenos resultados en la caracterización del agua siendo este un método más rápido en comparación con la medición de los parámetros convencionales, ayudando así en la evaluación del funcionamiento de la planta de potabilización de manera más efectiva.

A partir del conocimiento adquirido y el generado durante la elaboración de este documento se hacen las siguientes recomendaciones:

- El mantenimiento en el sistema de captación es de suma importancia ya que este afecta en la calidad del agua captada.
- Las principales fuentes de contaminación son las aves, los pequeños mamíferos y los restos acumulados en los tejados. El efecto de estas fuentes se puede reducir al mínimo mediante medidas sencillas: deben limpiarse periódicamente los canalones; eliminarse en lo posible las ramas que cuelgan sobre el tejado (porque pueden ser fuente de restos vegetales y porque favorecen el acceso a las zonas de captación del tejado de pájaros y pequeños mamíferos); y disponerse en las tuberías de entrada a los depósitos tamices que eviten la entrada de hojas.

- Al implementar una planta de potabilización es importante darle mantenimiento y supervisar las barreras en especial a los filtros de arena ya que este puede presentar contaminación consecuencia de un mal lavado del material filtrante.
- Revisar periódicamente la calidad del efluente ya que los filtros pueden colmatarse reduciendo la calidad de este para así poder saber cuándo es necesario un cambio de cartucho.
- Establecer manuales de operación de la plantas de potabilización para que el usuario pueda hacer un buen uso de esta.
- Mantener involucrada a los usuarios en el proyecto que se lleva a cabo para poder contar con su apoyo durante su realización y en el mantenimiento del mismo, teniendo así un buen funcionamiento de la planta de potabilización.

## REFERENCIAS

- Abdulla, F. A., & Al-Shareef, A. (2006). Assessment of rainwater roof harvesting systems for household water supply in Jordan. *Springer*, 291-300.
- Anaya, G. M., & Martínez, J. J. (2007). *Sistemas de captación y aprovechamiento del agua de lluvia para uso doméstico y consumo humano en América Latina y El Caribe*. México: Colegio de postgraduados.
- APHA, American Public Health Association. (1998). *Standar Methods for the Examination of water and wastewater*.
- Broadwell, M. (2001). *A practical particle counting for drinking water treatment*. Lewis Publishers.
- Cervantes Áviles, P. A., Bernal Martínez, A., & Cuevas Rodriguez, G. (2015). *Solución a la problemática del agua en México: Propuestas de jóvenes investigadores*. Guanajuato, Gto.: Universidad de Guanajuato.
- CONAGUA. (2007). *Usos del agua*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2014a). *Estadísticas del agua en México 2014*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2014b). *Atlas del Agua en México 2014*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2016). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Cultura del agua*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- Diario Oficial de la Federación. (1993). *Procesos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados*. México, D.F.
- Diario Oficial de la Federación. (1994). *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*. México, D.F.
- Diario Oficial de la Federación. (2001). *Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001, determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas*. México, D.F.
- Diario Oficial de la Federación. (2001). *Norma Mexicana NMX-AA-036-SCFI-2001, determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas*. México, D.F.

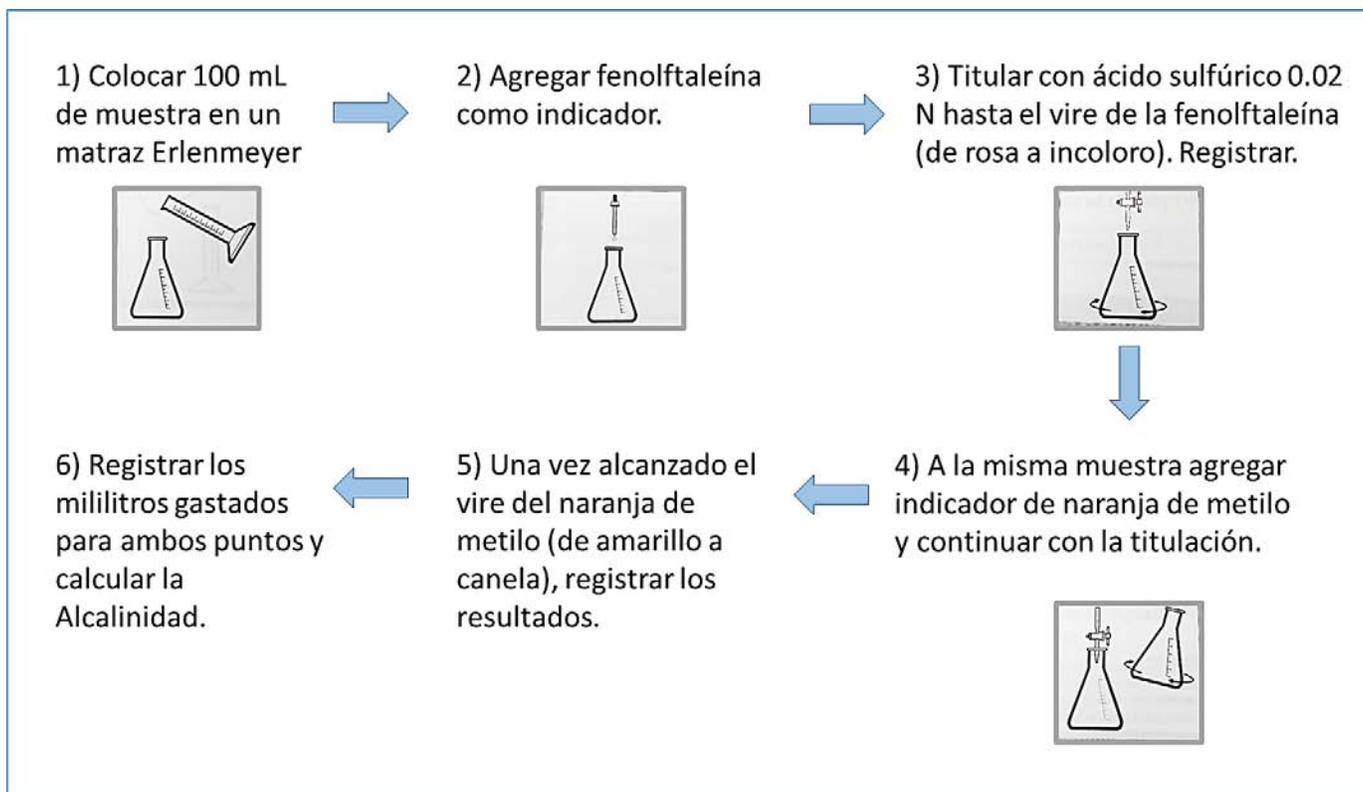
- Diario Oficial de la Federación. (2001). *Norma Mexicana NMX-AA-072-SCFI-2001, determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas*. México, D.F.
- García , R., Belmont, R., Padilla, H., Torres, M. C., & Baez, A. (2009). Trace metals and inorganic ion measurements in rain from Mexico City and a nearby rural area. *Chemistry and Ecology*, 71-86.
- García Velázquez, J. H. (2012). *Sistema de captación y aprovechamiento pluvial para un ecobarrio de la CD. de México*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Göbel, P., Dierkes, C., & Coldewey, W. G. (2007). Storm water runoff concentration matrix for urban areas. *J. Contaminant Hydrology*, 26-42.
- Gould, J., & Nissen-Petersen, E. (1999). *Rainwater Catchment Systems for Domestic Supply: Design, Construction and Implementation*. EUA: Action Publishing.
- HACH . (2003). *Water Analysis Handbook*. Loveland, Colorado, U.S.A: HACH COMPANY.
- Herrera Monroy, L. A. (2010). *Estudio de alternativas para el uso sustentable del agua de lluvia*. Ciudad de México: Instituto Politecnico Nacional.
- INEGI. (2015). *Encuesta Intercensal* . Ciudad de México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Jeffrey, A. (2006). *Carbón Activado: Avances modernos para una tecnología antigua*. Agion Technologies.
- Levine, A., Tchobanoglous, G., & Asano, T. (1991). Particle Contaminants in Wastewater: a Comparison of Measurement Techniques and Reported Particle Size Distributions. *Fluid and Particle Separation Journal*, 88-106.
- Metcalf, & Eddy. (1996). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. México: MacGraw Hill.
- Mitchell, V. G., Mccarthy, D. T., Deletic, A., & Fletcher, D. T. (2008). Urban stormwater harvesting-sensitivity of a storage behaviour model. *Environ. Modelling & Software*, 782-793.
- OMM/UNESCO. (2012). *Glosario Hidrológico Internacional*. Ginebra, Suiza.
- OMS. (2006). *Guías para la calidad del agua potable*. Organización Mundial de la Salud.
- PROFECO. (2000). *Calidad de filtros purificadores de agua*. Ciudad de México: Procuraduría Federal del Consumidor.

- RAIN. (2008). *Rain Water Quality Guidelines*.
- Rojas Valencia, M. N., Gallardo Bolaños, J. R., & Martínez Coto, A. (2012). Implementación y caracterización de un sistema de captación y aprovechamiento de agua de lluvia. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 16-23.
- Rojas, J. A. (1999). *Calidad del agua*. Alfaomega.
- SEMARNAT. (2014). *Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento*. México, D.F.
- Shiklomanov, I. (1993). World fresh water resources. En *Water in crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*. de Peter H. Gleick. New York: Oxford University Press.
- Toledo, A. (2002). El agua en Mexico y en el mundo. *Gaceta Ecológica, INE-SEMARNAT México*, 9-18.
- Water Texas Development Board. (2005). *The Texas manual on rainwater harvesting. Development*.



## ANEXO 1 MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DEL AGUA

### DETERMINACIÓN DE LA ALCALINIDAD



### Cálculos

Calcular la alcalinidad total como  $\text{CaCO}_3$  en mg/L, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Alcalinidad total en mg CaCO}_3/\text{L} = \left( \frac{(A - B) \cdot N}{C} \right) \cdot 50 \cdot 1000$$

Donde:

A = volumen total gastado de ácido sulfúrico en la muestra para la titulación al vire del anaranjado de metilo, (mL)

B = volumen de ácido gastado en la muestra para la titulación del blanco, (mL)

N = normalidad de la disolución del ácido sulfúrico, (N)

C = volumen de la muestra, (mL)

50 = factor para convertir eq/L a mg  $\text{CaCO}_3$ /L

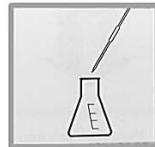
1000 = factor para convertir mL a L

## DETERMINACIÓN DE DUREZA TOTAL

1) Colocar 50 mL de muestra en un matraz Erlenmeyer



2) Agregar 2 mL de solución amortiguadora de amonio y verificar que el pH > 10.

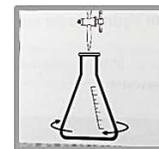


3) Agregar indicador negro de ericromo.



5) Registrar los mililitros gastados y calcular la Dureza Total.

4) Titular con EDTA 0.01 M hasta el vire del negro de ericromo (de morado a azul).

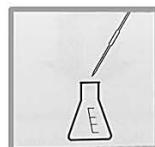


## DETERMINACIÓN DE DUREZA AL CALCIO

1) Colocar 50 mL de muestra en un matraz Erlenmeyer



2) Agregar 2 mL de NaOH 1 N y verificar que el pH este en un intervalo de 12-13.



3) Agregar el indicador murexida.



5) Registrar los mililitros gastados y calcular la Dureza al Calcio.

4) Titular inmediatamente con EDTA 0.01 M hasta el vire de la murexida (de rosa a morado).



## Cálculos

- ✚ Calcular la dureza total y la dureza al calcio con la siguiente ecuación:

$$\text{Dureza en mg CaCO}_3/\text{L} = \frac{(A - B) \cdot C \cdot 1000}{D}$$

Donde:

A = volumen de EDTA gastado en la titulación de la muestra, (mL)

B = volumen de EDTA gastado en la titulación del blanco, (mL)

C = mg de CaCO<sub>3</sub> equivalentes a 1 mL de EDTA

D = volumen de muestra, (mL)

$$C = M \cdot P.M$$

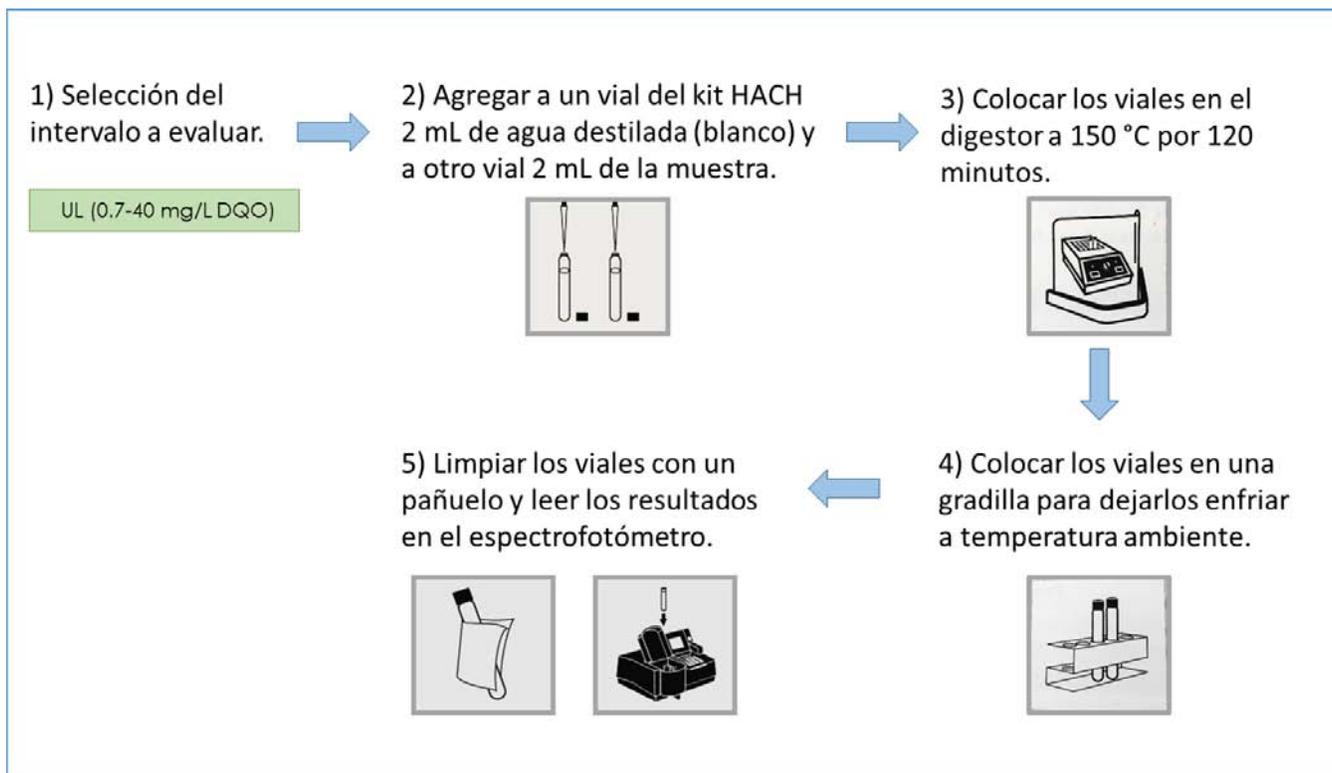
M = molaridad de la disolución de EDTA, (M)

P.M = peso molecular del CaCO<sub>3</sub>, (g/mol)

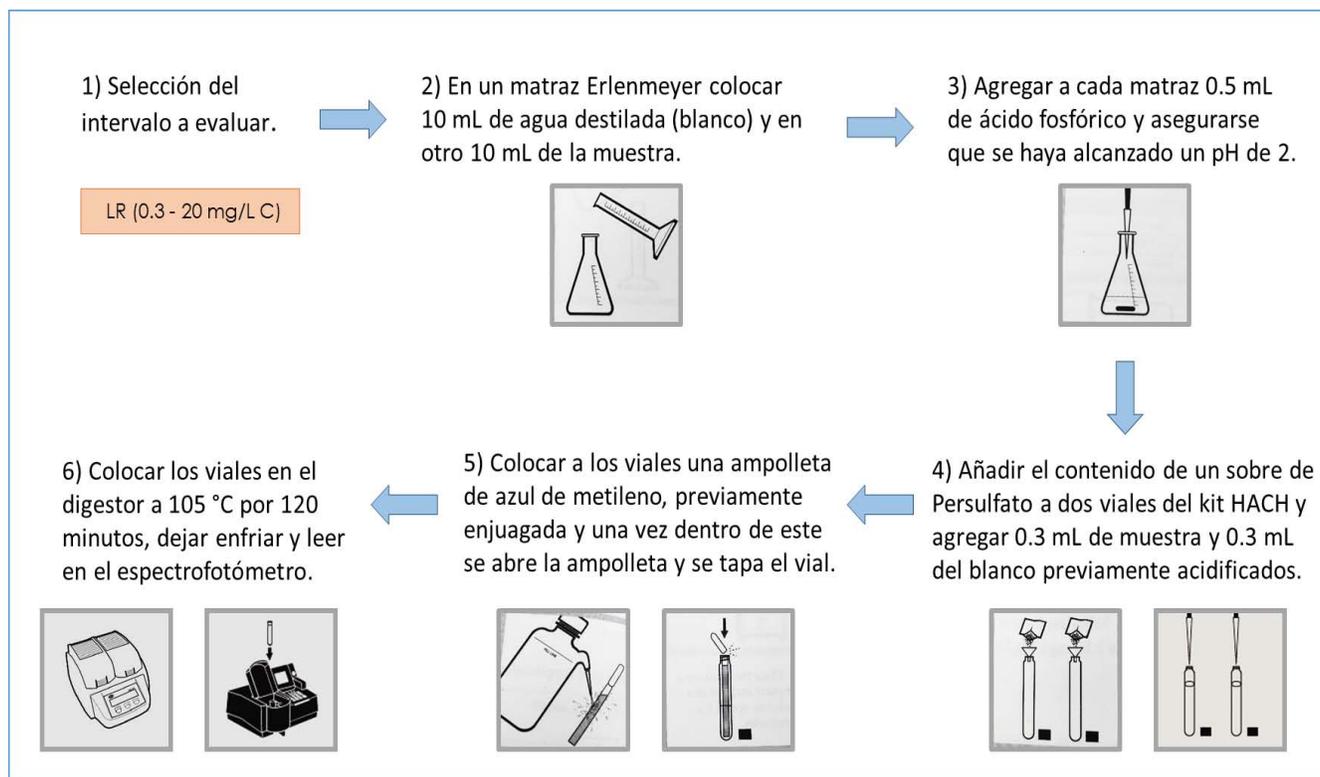
- ✚ Calcular la dureza debida al magnesio con la siguiente ecuación:

$$\text{Dureza al magnesio en mg CaCO}_3/\text{L} = \text{Dureza total} - \text{Dureza al calcio}$$

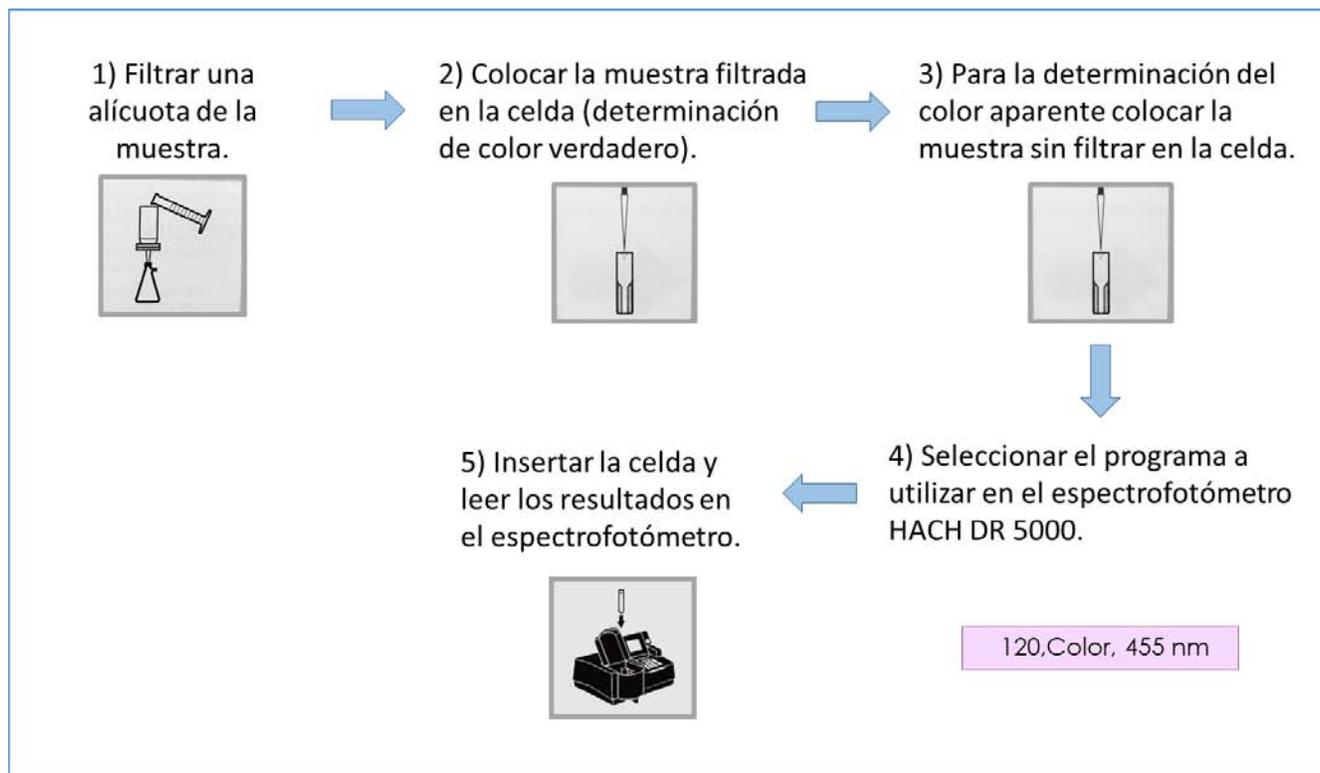
## DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO



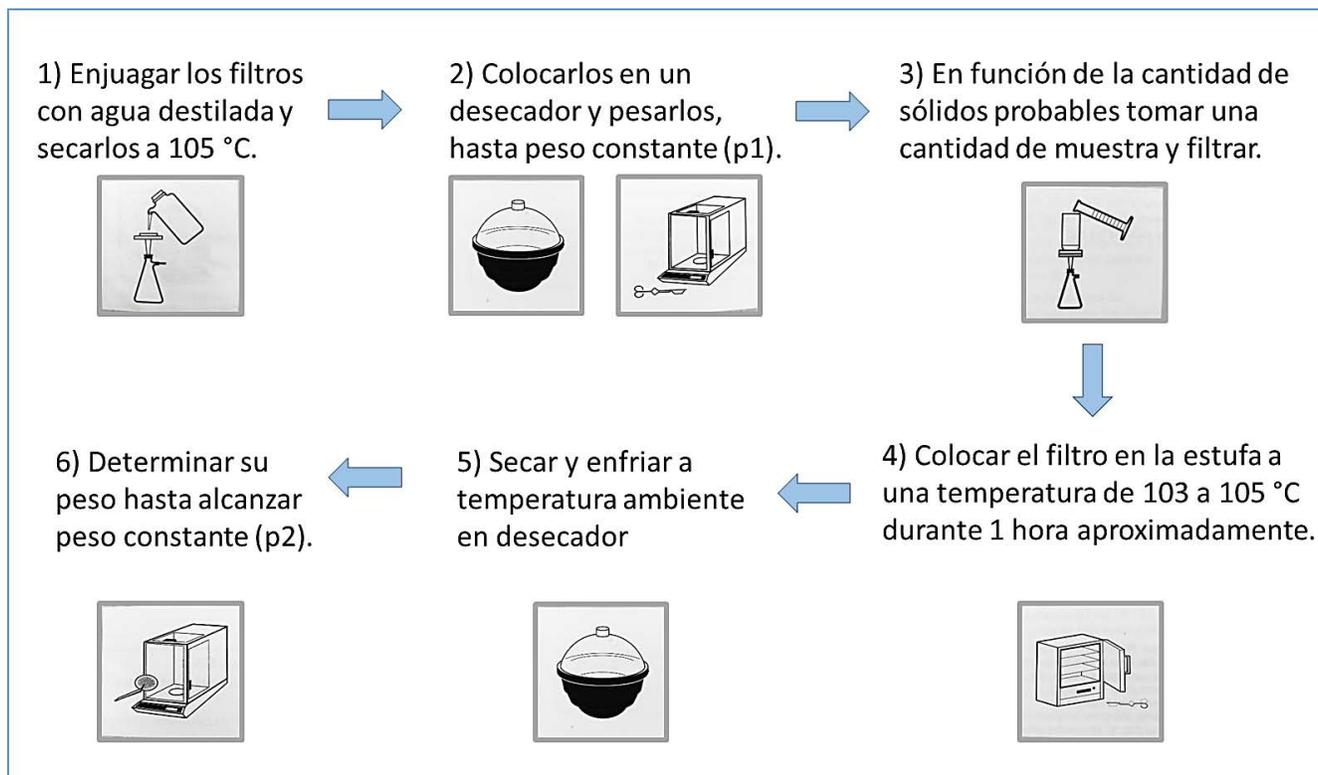
## DETERMINACIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO TOTAL



## DETERMINACIÓN DE COLOR VERDADERO Y COLOR APARENTE



## DETERMINACIÓN DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES



### Cálculos

Calcular los sólidos suspendidos totales con la siguiente ecuación:

$$SST \text{ en mg/L} = \frac{p_2 - p_1}{v} \cdot 1000$$

Donde:

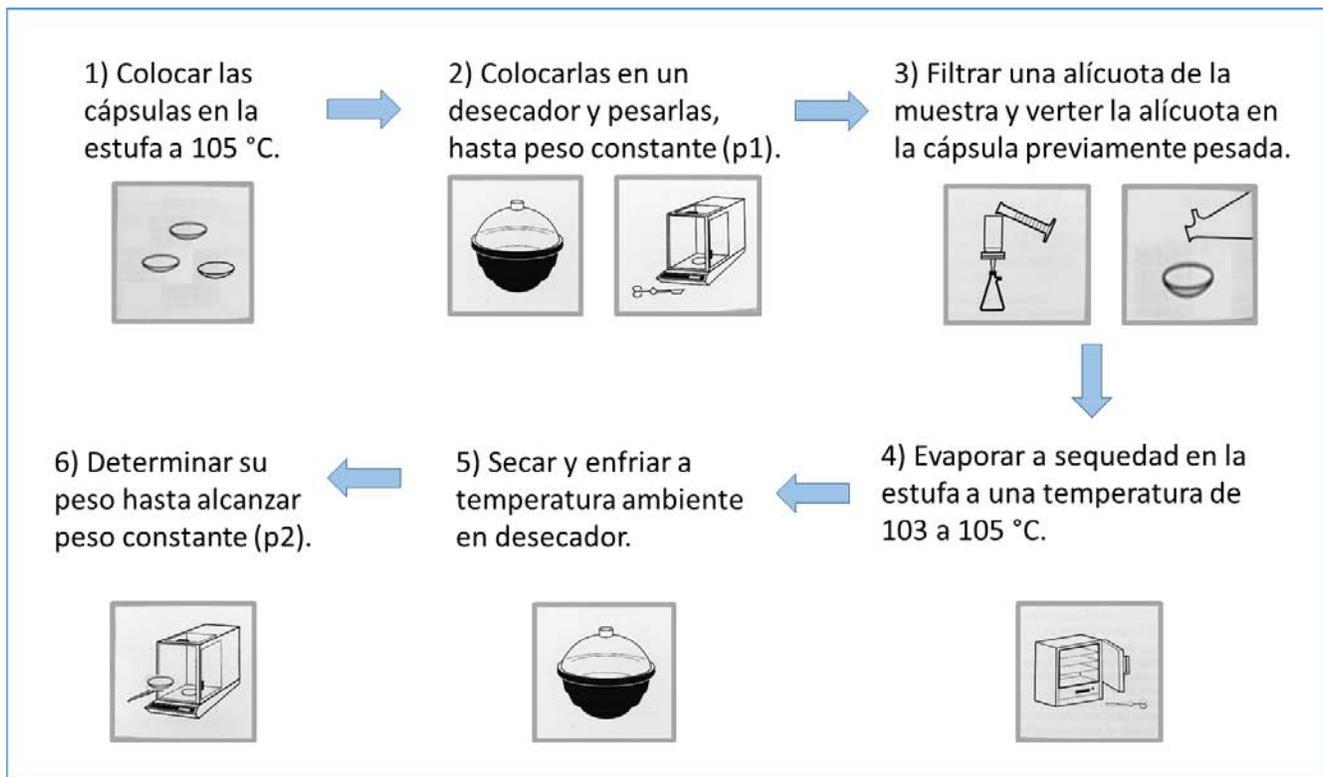
P<sub>1</sub> = peso del filtro sin muestra, (mg)

P<sub>2</sub> = peso del filtro con muestra, (mg)

v = volumen de la muestra, (mL)

1000 = factor para convertir mL en L

## DETERMINACIÓN DE LOS SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES



### Cálculos

Calcular los sólidos disueltos totales con la siguiente ecuación:

$$SDT \text{ en mg/L} = \frac{p_2 - p_1}{v} \cdot 1000$$

Donde:

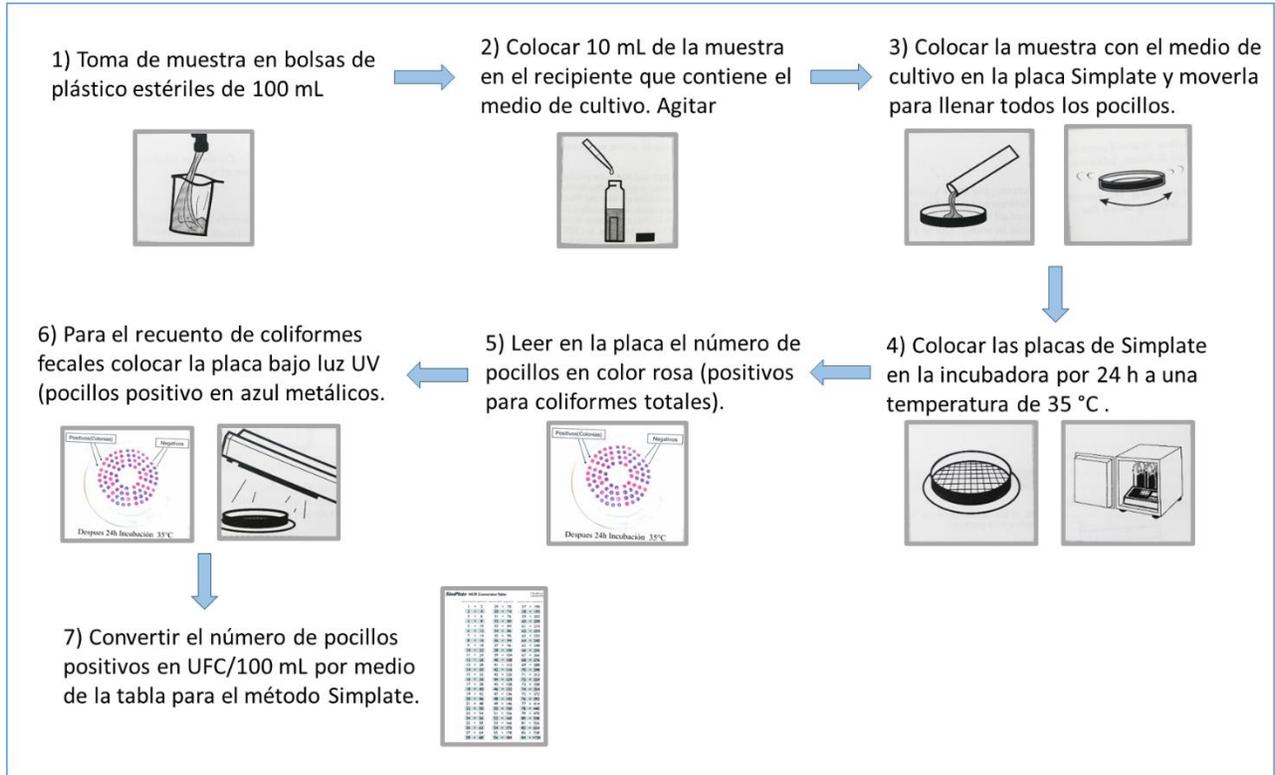
P<sub>1</sub> = peso de la cápsula sin muestra, (mg)

P<sub>2</sub> = peso de la cápsula con muestra evaporada, (mg)

v = volumen de la muestra, (mL)

1000 = factor para convertir mL en L

## DETERMINACIÓN DE COLIFORMES TOTALES Y COLIFORMES FECALES



## MEMORIA FOTOGRÁFICA DE LA CARACTERIZACIÓN DEL AGUA POR MEDIO DE LOS MÉTODOS ANTES MENCIONADOS



IMAGEN 1 DETERMINACIÓN DE SST



IMAGEN 2 DETERMINACIÓN DE SDT



IMAGEN 3 MEDICIÓN DE LA TURBIEDAD



IMAGEN 4 DETERMINACIÓN DE LA DUREZA TOTAL



IMAGEN 5 DETERMINACIÓN DE LA DUREZA DE CALCIO



IMAGEN 6 DETERMINACIÓN DEL COT



IMAGEN 7 DETERMINACIÓN DE LA ALCALINIDAD



IMAGEN 8 DETERMINACIÓN DE LA DQO



IMAGEN 9 DIGESTIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DEL COT



IMAGEN 10 MÉTODO PARA CF Y CT



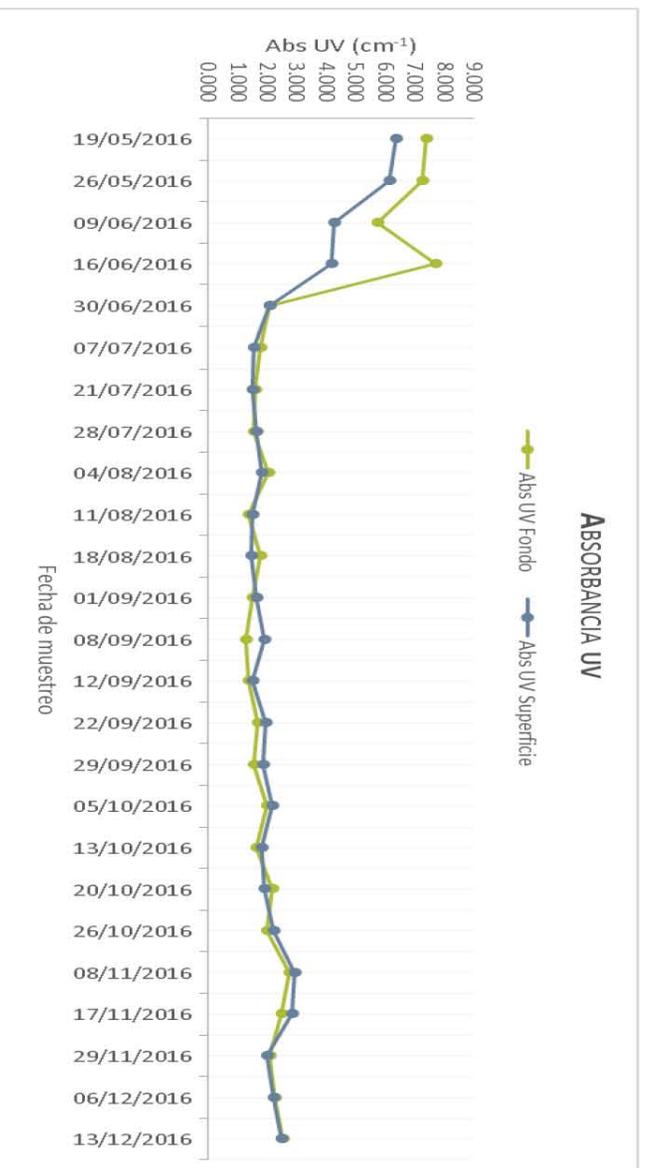
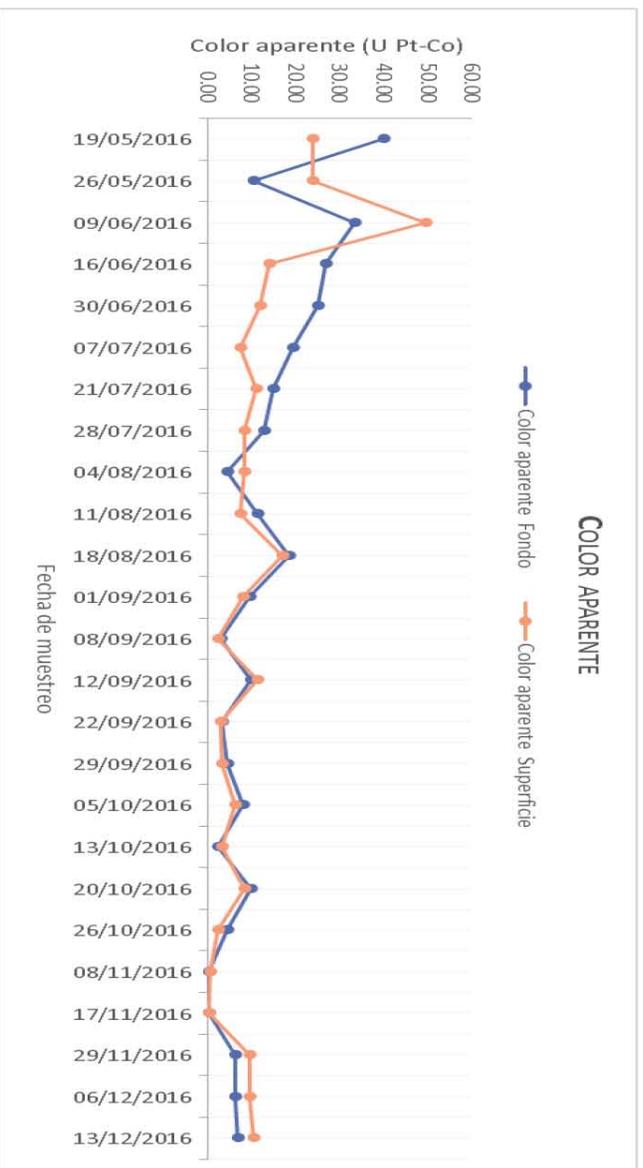
IMAGEN 11 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS PARA CT Y CF

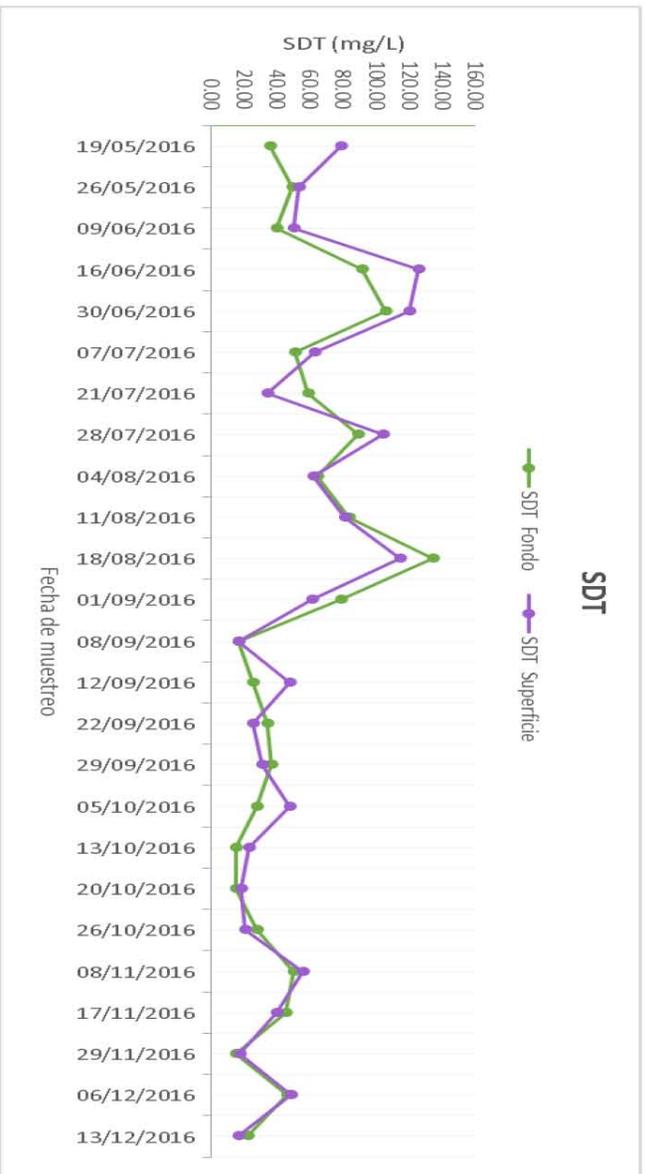


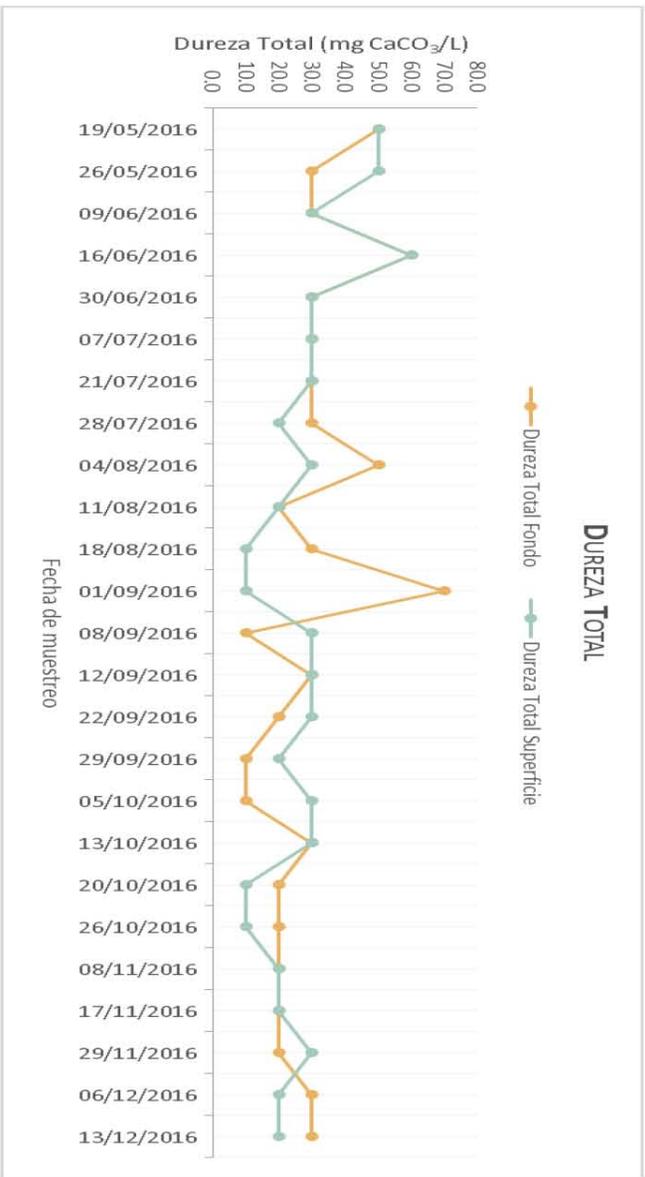
IMAGEN 12 LECTURA DE PLACA BAJO LUZ UV PARA CF

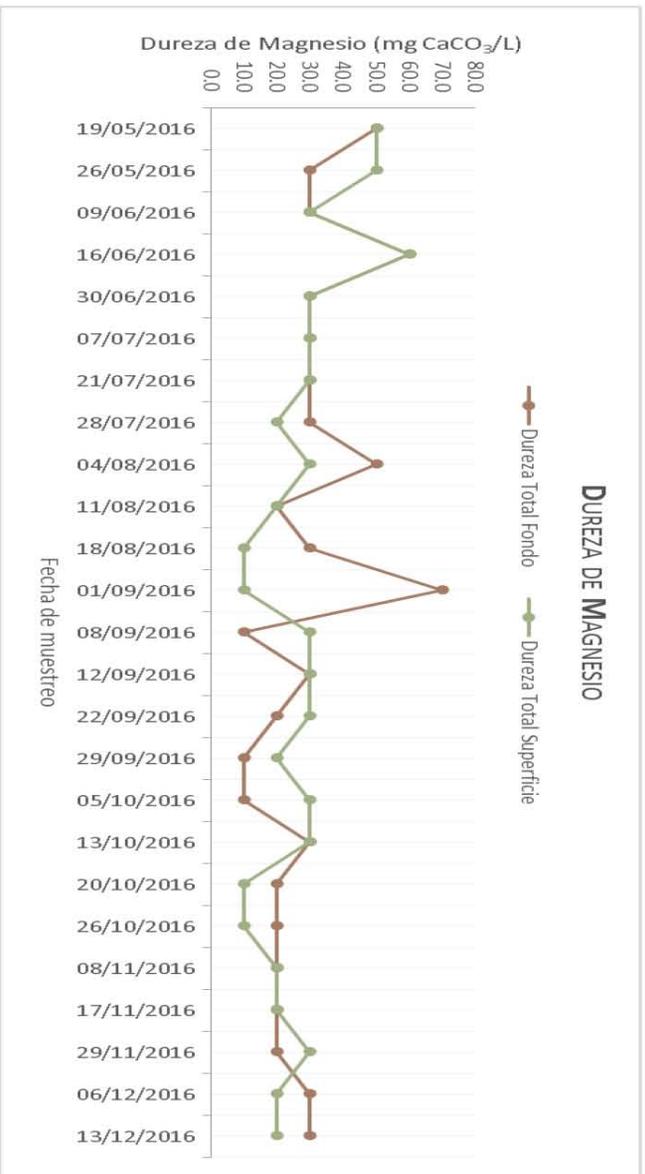
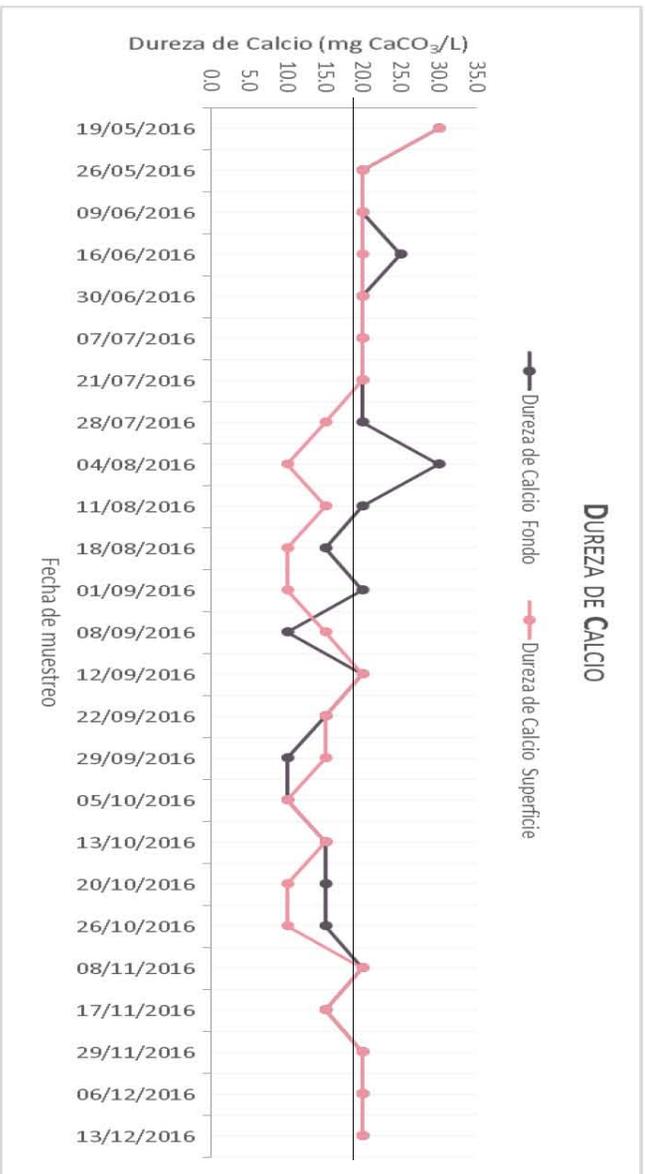
## ANEXO 2 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CARACTERIZACIÓN

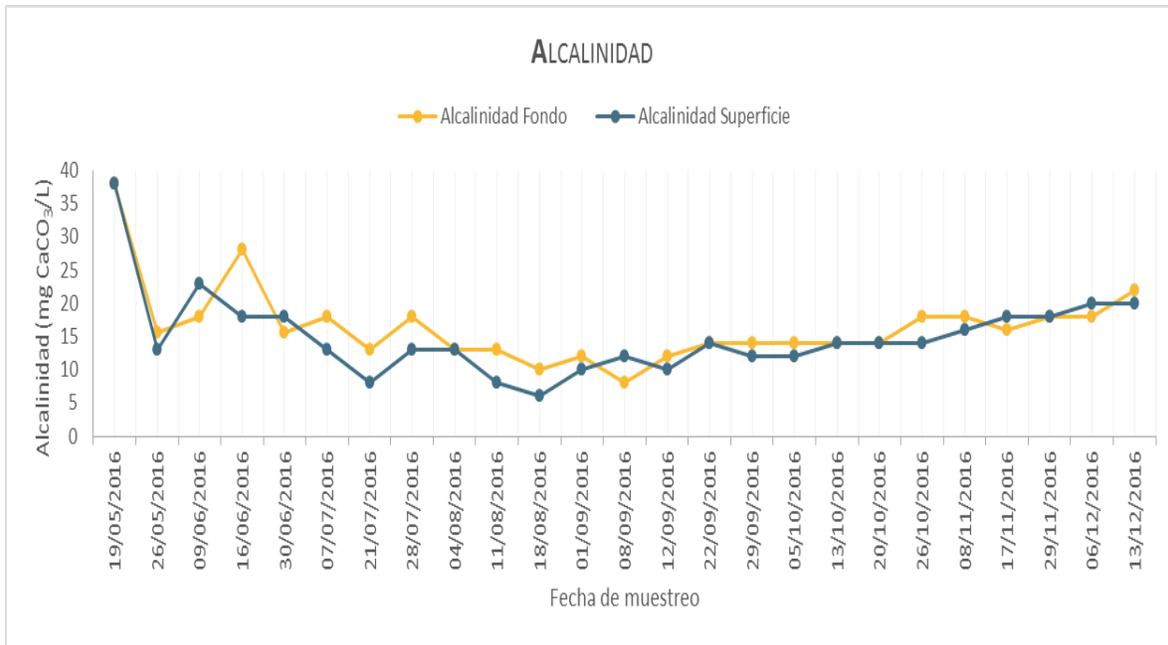
RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CARACTERIZACIÓN DEL AGUA PREVIO A SU PROCESO DE POTABILIZACIÓN, PARA LOS PUNTOS DE MUESTREO "FONDO" Y "SUPERFICIE".











RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CARACTERIZACIÓN DEL AGUA EN LAS DIFERENTES BARRERA DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN.

