



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

***VARIABILIDAD DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LLUVIA EN LOS SISTEMAS
DE ALMACENAMIENTO Y SU POTENCIAL COMO FUENTE PARA
ABASTECIMIENTO***

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

NOE BELLO TEPECTZIN



CD. MX. 7 DE AGOSTO AÑO 2018



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.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor: Víctor Manuel Luna Pabello.**

VOCAL: **Profesor: Luz María Lazcano Arriola.**

SECRETARIO: **Profesor: Alma Concepción Chávez Mejía.**

1er. SUPLENTE: **Profesor: Alejandra Mendoza Campos.**

2° SUPLENTE: **Profesor: David Fragoso Osorio.**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

INSTITUTO DE INGENIERÍA.

Asesor del tema: _____

Dra. Alma C. Chávez Mejía.

Supervisor técnico: _____

Dr. Rafael Magaña López.

SUSTENTANTE: _____

Noe Bello Tepectzin.

AGRADECIMIENTOS.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por permitirme de hacer uso de sus instalaciones para poder desarrollar mi tesis y obtener experiencia en el campo de la ingeniería ambiental, así como el proyecto de “Aseguramiento de la cantidad y calidad del agua almacenada en proyectos de captación de agua de lluvia en México” II-UNAM Proy. 6335.

RESUMEN.

La importancia de esta tesis es determinar la viabilidad de la calidad del agua de lluvia en un sistema de captación de agua de lluvia (SCALL) de la Academia Mexicana de Ciencias (AMC) en la temporada de lluvias.

En este estudio la variabilidad se evaluó durante el periodo comprendido entre el 2 de mayo de 2017 al 31 de enero de 2018. Para su realización se efectuaron 4 muestreos mensuales en dos puntos de interés denominado "Superficie" (columna de la superficie) y "Fondo" (columna en el fondo). El primero recuperado de la parte de la columna superior de agua y el segundo de la inferior de una cisterna ubicada en el reservorio del auditorio "Galileo Galilei" de la Academia Mexicana de Ciencias (AMC) ubicada en la Alcaldía de Tlalpan en la Ciudad de México.

Se determinó la calidad con base en los parámetros regulados en la Norma de Agua Potable (NOM-127-SSA1-1994), estos parámetros, fueron seleccionados con base a estudios previos realizados de calidad en agua de lluvia, los cuales son: coliformes (fecales y totales), color (aparente y verdadero), dureza total, pH, sólidos disueltos totales (SDT), turbiedad y otros de interés como: absorbancia UV_{254} , alcalinidad, carbono orgánico total (COT), demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (SST) realizando las pruebas correspondientes para su determinación. Con estos parámetros es posible determinar si es potable o no.

Los resultados indican que la calidad del agua de lluvia captada presenta variabilidad con respecto al tiempo en la calidad del agua de lluvia captada, siendo el punto de muestreo donde fue mayor en comparación con la "Superficie", debido principalmente al aumento del contenido de sólidos sedimentados provocando un aumento en el valor del color con un 47%, COT en un 41%, absorbancia UV_{254} en un 28%, alcalinidad en un 33% y el %100 de coliformes totales. Sin embargo, con base en la prueba de hipótesis, esta variabilidad no es significativa, por lo cual, las calidades de agua de lluvia en ambos puntos de muestreo son semejantes. Por otro lado, se recomienda hacer uso del agua en la "Superficie", debido a que en el "Fondo" se presentan sólidos sedimentados.

Por otro lado, los parámetros como coliformes totales y turbiedad se encontraron por arriba de los Límites Máximos Permisibles (LMP) que establece la norma (0 UFC/100ml en coliformes y 5 NTU en turbiedad) teniendo 0.86 ± 1.95 UFC en “Superficie” y 1.14 ± 1.07 UFC en “Fondo” en promedio de coliformes totales y 9.14 ± 4.01 NTU en “Superficie” y 8.78 ± 3.64 NTU en “Fondo” en promedio de turbiedad.

Por último, las infografías generadas auxilian en la implementación, operación y mantenimiento de sistemas de captación de agua de lluvia para cubrir diferentes necesidades de abastecimiento en cuanto a volumen y mantenimiento de calidad del agua sobre todo durante su captación y mantenimiento, por lo que en cada sistema de SCALL debería contar con dicho material.

El SCALL es una tecnología que constituye una alternativa para abastecimiento de agua potable en sitios donde existe un uso restringido de agua y excelente donde las condiciones de precipitación son mayores a 1000 mm, pudiendo ser utilizadas inclusive como fuente principal de suministro.

INDICE.

INDICE.	6
ÍNDICE DE TABLAS.	9
ÍNDICE DE FIGURAS.	10
ÍNDICE DE ECUACIONES.	12
INTRODUCCION.	13
CAPITULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	17
1.1- Objetivos.....	17
1.1.1.- General.	17
1.2.2.- Particulares.	17
1.2.-Hipótesis.....	17
1.3.- Definición del problema.	18
CAPITULO 2- MARCO TEORICO.	19
2.1.- Antecedentes.....	19
2.1.1.- El agua en el mundo.	19
2.1.2.- Situación del agua en México.	20
2.1.3.- Situación del agua en el Valle de México.....	24
2.2.- Sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL).	27
2.2.1.- SCALL en el mundo.	27
2.2.2.- SCALL en México.	28
2.2.3.- Componentes de un sistema de captación de agua de lluvia.	30
2.2.4.- Efecto del material del techo en la calidad de un SCALL.....	33
2.2.5.- Mantenimiento de un sistema de captación de agua de lluvia.	34

2.2.6.- Ventajas y desventajas de un SCALL.	35
2.2.7.- Bases de diseño para un sistema de captación de agua de lluvia.	36
2.2.8.- Normatividad.	38
2.3.- Usos del agua de lluvia.	39
CAPITULO 3.- METODOLOGÍA	41
3.1.- Zona de estudio.	41
3.1.2.- Climatología.	41
3.1.3.- Situación del agua potable en la zona.	42
3.1.4.- Academia Mexicana de Ciencias (AMC).	42
3.1.5.- Sistema de captación de agua de lluvia de la Academia Mexicana de Ciencias.	44
3.2.- Cálculo de captación de agua de lluvia considerando área de la AMC.	45
3.3.- Determinación de los puntos de muestreo.	47
3.4.- Período de muestreo.	48
3.5.- Muestreo del agua de lluvia.	48
3.6.- Caracterización del agua de lluvia y material empleado.	50
3.7.- Prueba de hipótesis.	52
CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
4.1.- Comparación de demanda anual de agua con la captación promedio anual.	54
4.1.- Calidad de agua de lluvia en el sistema de captación.	55
4.2.- Calidad del agua respecto al tiempo de almacenamiento y su comparativa con los valores normados.	62

4.3.- Aplicación de la prueba de hipótesis a los resultados.....	67
4.5.- Infografías de decisión para la captación del agua de lluvia.....	68
CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	79
CAPITULO 6.- REFERENCIAS.	81
ANEXO 1.- MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DEL AGUA.....	87
ANEXO 2.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA PRUEBA DE HIPÓTESIS.....	94

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1.- Distribución de las fuentes de abastecimiento al Valle de México. Fuente: BANCO MUNDIAL, 2013.....	25
Tabla 2.- Balance hídrico de los acuíferos locales que abastecen al Valle de México. Fuente: BANCO MUNDIAL, 2013.	25
Tabla 3.- Proyección de población del Valle de México. Fuente: Banco Mundial, 2013.	26
Tabla 4. Ventajas y desventajas en el empleo de los SCALLs.....	35
Tabla 5.- Coeficientes de escurrimiento por el tipo de material. Fuente: MNX-AA-164-SCFI-2013.....	37
Tabla 6.- Límites permisibles de contenido de parámetros físico-químicos y biológicos. Fuente: NOM-127-SSA1-1994.	39
Tabla 7.- Geomorfología de la Alcaldía de Tlalpan. Fuente: SEDESOL, 2011.	43
Tabla 8.- Captación de agua de lluvia mensual promedio. Fuente: Elaboración propia con datos de CLICOM,2018.	46
Tabla 9.- Parámetros con las unidades correspondientes y equipos empleados. Fuente: Elaboración propia.	50
Tabla 10.- Métodos para la determinación de los parámetros. Fuente: Elaboración propia.	51
Tabla 11.- Prueba de hipótesis a los resultados obtenidos para evaluar la significancia de calidad entre los puntos de muestreo.	68
Tabla 12.- Análisis estadístico de T-Student.	94

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1.- Distribución del agua en el mundo. Fuente: CONAGUA, 2015.....	19
Figura 2.- Ríos en México. Fuente: CONAGUA,2017.	21
Figura 3.- Principales lagos en México. Fuente: CONAGUA, 2017.	22
Figura 4.- Acuíferos en México. Fuente: CONAGUA, 2017.....	22
Figura 5.- Precipitación pluvial en México. Fuente: CONAGUA, 2017.....	24
Figura 6.- Esquema de los principales componentes de un SCALL.....	30
Figura 7.- Diagrama de los componentes de un SCALL. Fuente: Organización Panamericana de la Salud, 2010.	33
Figura 8.- Climatología de Tlalpan y ubicación de la AMC. Fuente: INEGI, 2005. Prontuario de Información Municipal de los Estados Unidos Mexicanos	41
Figura 9.- Localización de la AMC. Fuente: Google Earth 2018.....	43
Figura 10.- Aperturas de la azotea para la conducción del agua de lluvia.	44
Figura 11.- Techo de la AMC utilizado para la captación de agua de lluvia.	44
Figura 12.- Cisterna de almacenamiento de agua de lluvia.	44
Figura 13.- Rejillas para la detención de sólidos.....	44
Figura 14.- Precipitación mensual promedio. Fuente: Elaboración a partir de los datos climáticos de CLICOM a través de su plataforma web del CICESE (http://clicom-mex.cicese.mx).2018.....	46
Figura 15.- Recipiente con muestra de agua de lluvia de la AMC de Superficie (a) y Fondo (b).....	49
Figura 16.- Whirl-Pak Thio-Bag con muestra de Superficie (a) y Fondo (b).....	49

Figura 17.- Demanda mensual VS el volumen de captación mensual. Fuente: Elaboración propia.	54
Figura 18.- Datos de turbiedad, color, Abs, COT, DQO, coliformes fecales y totales. Fuente: Elaboración propia.	56
Figura 19.- Turbidímetro HACH 2100 N para la determinación de turbiedad de muestra de agua recuperada de la AMC.....	57
Figura 20.- Espectrofotómetro DR 5000 para la determinación de absorbancia UV y color de las muestras recuperadas de la AMC.....	58
Figura 21.- Determinación experimental de COT(a) y DQO(b), donde “F” es el “Fondo” y “S” la “Superficie”.	59
Figura 22.- Determinación de coliformes, método Simplate.....	60
Figura 23.- Datos de SDT, dureza total y alcalinidad. Fuente: Elaboración propia.	60
Figura 24.- Determinación de dureza total por cambio de color de rosa a azul mediante titulación de EDTA.....	61
Figura 25.- Determinación de alcalinidad por cambio de color de amarillo a naranja mediante titulación de H ₂ SO ₄	62
Figura 26.- Comparación de la variabilidad del pH con el LMP de la NOM-127-SSA-1994.	63
Figura 27.- Comparación de la variabilidad del Color con el LMP de la NOM-127-SSA-1994.....	64
Figura 28.- Comparación de la variabilidad de la Turbidez con el LMP de la NOM-127-SSA-1994.....	65
Figura 29.- Comparación de la variabilidad de la Dureza Total con el LMP de la NOM-127-SSA-1994.	65

Figura 30.- Comparación de la variabilidad de los Coliformes Totales con el LMP de NOM-127-SSA-1994.	67
Figura 31.- Superficie de captación.....	70
Figura 32.- Sistemas de recolección y distribución.	72
Figura 33.- Tanques de almacenamiento.....	74
Figura 34.- Tanques de almacenamiento subterráneos y superficiales.	76
Figura 35.- Mantenimiento de un SCALL.	78

ÍNDICE DE ECUACIONES.

Ecuación 1 (Cálculo de la precipitación anual promedio).....	36
Ecuación 2 (Cálculo del volumen anual promedio):	36
Ecuación 3 (Cálculo de la demanda de agua anual):	37
Ecuación 4 (Cálculo del volumen del tanque de almacenamiento):	37
Ecuación 5 (cálculo de la variancia entre dos grupos de muestras):.....	52
Ecuación 6 (Determinación de t)	53
Ecuación 7 (Grados de libertad entre grupos).....	53

INTRODUCCION.

Los humanos han almacenado y distribuido agua durante siglos para sustentar un modo de vida sedentario, en contraste con lo ocurrido durante su etapa de nómada, donde era cazador y hacía uso de agua del río para beber; ubicándose en las inmediaciones de los cuerpos de agua disponibles. De hecho, cuando se producían asentamientos, estos se localizaban siempre cerca cuerpos de agua y si no estaban disponibles, se hacía uso del agua subterránea por medio de la construcción de pozos. Sin embargo, una mala gestión y la presencia de contaminantes ha limitado dicha fuente para satisfacer una población en franco crecimiento (LENNTECH, 2010).

Por otro lado, el crecimiento de la población anual se estima en 80 millones de personas. El anterior, en combinación con fenómenos de urbanización, industrialización, aumento de la producción y un consumo desmedido han derivado en una demanda de agua dulce cada vez mayor (UNESCO, 2015). No obstante, a nivel mundial 2,500 millones de personas dependen exclusivamente de los recursos de aguas subterráneas para satisfacer sus necesidades básicas (UNESCO, 2012). De hecho, las aguas subterráneas abastecen de agua potable por lo menos al 50% de la población mundial, que representa el 43% de toda el agua utilizada para el riego (FAO, 2010). Por otro lado, se estima que el 20% de los acuíferos mundiales son sobreexplotados, conllevando graves consecuencias, tales como el hundimiento del suelo y la intrusión de agua salada a fuentes de agua dulce (UNESCO, 2015).

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), las distintas fuentes y métodos de distribución de agua potable en el mundo incluyen: los sistemas mejorados de abastecimiento de agua a las conexiones domiciliarias, las fuentes públicas de agua, los pozos o fuentes protegidas y la recolección de agua de lluvia. No obstante, que el abastecimiento no ha mejorado, recurriendo a fuentes alternas tales como pozos irregulares, fuentes sin protección ni regulación y el abastecimiento de agua a través de vendedores de pipas o agua embotellada (OMS, 2011).

Una de las alternativas en exploración se encuentra constituida por el aprovechamiento del agua de lluvia (de manera segura); sobre todo en poblaciones donde por economía de escala no es posible emplear métodos convencionales (abastecimiento mediante red primaria y secundaria). Estas poblaciones son generalmente comunidades marginadas que se ubican en zonas rurales o marginales; poblaciones donde la escasez de agua potable es mayor. Por lo tanto, los sistemas de captación de agua de lluvias (SCALLs) son considerados como un método para el suministro de agua a los hogares, donde ella es empleada para riego de jardines o cultivos, limpieza general de la vivienda, e inclusive consumo; siempre y cuando sea potabilizada. Ello para asegurar la inocuidad del líquido al ser ingerida.

De hecho los SCALLs han sido empleados desde la antigüedad para el abastecimiento de las ciudades. Por ejemplo, en el imperio romano estos sistemas se les nombraba *impluvium*, mientras que los árabes lo conocían como *aljibes*. En el México prehispánico también se hicieron uso de estos sistemas, donde destacan los denominados *jagüeyes*, que fueron muy comunes en el centro y sur de México, en especial en las zonas áridas y semiáridas, así como los *chultunes*, utilizados por los habitantes mayas (Murillo, *et al.*, 2009)

Actualmente, su empleo ha sido impulsado en varias partes del mundo, incluyendo México. Sin embargo, el agua almacenada en el sistema no se puede utilizar para abastecimiento público sin pasar por un sistema de potabilización que garantice su calidad. Para ello, es necesario realizar una serie de pruebas donde se verifica si los parámetros se encuentran dentro de los límites máximos permisibles (LMP) que marca la normatividad local encargada de regular la carga de un contenido particular. Si estos son rebasados, se hace imperativo el empleo de un proceso de tratamiento con el fin de reducir el riesgo ambiental que pudiera constituir algún agente presente.

La calidad de agua es un poderoso indicador ambiental para la salud, ya que por un lado puede brindar bienestar, y por el otro una mala administración puede constituir un medio para la disminución de calidad ambiental para todos los componentes del ecosistema (bióticos y abióticos). En caso particular, la transmisión de

enfermedades hídricas constituyen uno de los puntos críticos a cuidar, donde los padecimientos gastrointestinales constituyen el cuadro patológico de mayor frecuencia, ocupando el segundo lugar de morbilidad a nivel mundial¹ sobre la población sensible constituida por niños, adultos mayores e individuos con el sistema inmune comprometido (OMS, 2011).

Asimismo, otra vía de infección de origen hídrico es de tipo fecal-oral, que presenta algunas variantes, tales como la originada por la contaminación de las zonas de captación del agua potable por heces fecales (humanas y animales) (OMS, 2011). De hecho, no solo las infecciones bacteriológicas están presentes en el agua, sino que también existen las generadas por agentes químicos, las cuales son comunes en países con normatividad no estricta. En particular, en nuestro país dicha problemática de contaminación se relaciona con la presencia de sustancias inorgánicas, tales como el arsénico y el fluoruro, que causan cáncer y lesiones, tanto dentales, como óseas (OMS, 2011).

En el análisis sobre la viabilidad de la captación de agua de lluvia en la Ciudad de México realizados por HESRAT, (2012) concluyen que esta técnica no debe de ser promovida como una medida generalizada, pues no se justifica económicamente (Romero, 2017). Sin embargo, aclararon que existen condiciones particulares dentro de la ciudad donde el abastecimiento de agua con SCALLs resulta ser de las opciones más favorables. De hecho, es importante mencionar que en 2016, el Jefe de Gobierno de la CDMX inició un proyecto de SCALL para zonas de la ciudad con abastecimiento limitado, tales como Cuajimalpa, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tláhuac y Xochimilco. De igual manera concluyeron que el suministro de agua con SCALLs en techos es viable en zonas de alta precipitación ($\geq 1,500$ mm anuales), en las viviendas que se abastecen parcial o totalmente mediante pipas,

¹ Es evaluada por la OMS con el fin de ofrecer una imagen completa de la situación mundial de la salud utilizando los años de vida ajustados en función de la discapacidad (AVAD) como una medida para cuantificar las pérdidas de vida sana.

así como zonas dispersas, donde por economía de escala no es posible lograr su cobertura.

El presente trabajo se divide en cinco capítulos:

- En el primero se detalla los objetivos e hipótesis del trabajo así como la descripción del problema a tratar.
- El segundo aborda la problemática del agua en el mundo y a nivel nacional. Asimismo, se describen los antecedentes sobre los SCALLs que actualmente se emplean en México y en el mundo, así como las partes que conforman los SCALLs y su funcionamiento, definiendo los parámetros a evaluar durante el proyecto y la normatividad empleada.
- El tercero presenta la metodología utilizada para la elaboración de este proyecto. En éste se describe la duración, las técnicas utilizadas y los equipos empleados para la determinación de cada parámetro utilizados para evaluar la calidad del agua.
- En el cuarto se señalan los resultados obtenidos a lo largo del proyecto y su análisis. De manera adicional se incluye las infografías de decisión que contiene las principales características que deben ser consideradas en el diseño de los SCALLs.
- En el último capítulo se plasman las conclusiones que se obtuvieron en la realización de este trabajo.
- Se incluye de de manera adicional un Anexo, donde se detallan las técnicas empleadas en la caracterización del agua y los resultados obtenidos de la prueba de hipótesis.

CAPITULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.1- Objetivos.

1.1.1.- General.

- Determinar la variabilidad de la calidad del agua de lluvia en los sistemas de almacenamiento y su uso potencial como una fuente de abastecimiento para el consumo humano.

1.2.2.- Particulares.

- Evaluar la calidad del agua de lluvia en la temporada de lluvia en dos puntos de referencia del sistema de captación con base en algunos parámetros establecidos en la normatividad mexicana vigente (NOM-127-SSA1-1994).
- Verificar su potencial como fuente alterna de abastecimiento para el consumo humano.
- Diseñar infografías de decisión para la implementación y mantenimiento de un SCALL para el buen funcionamiento del mismo.

1.2.-Hipótesis.

- Se estableció que:

$H_0 =$ La calidad del agua de lluvia en los sistemas de almacenamiento no cambiarán significativamente en los puntos de muestro durante la temporada de lluvias

$H_1 =$ La calidad del agua de lluvia en los sistemas de almacenamiento si cambiarán significativamente en los puntos de muestro durante la temporada de lluvias

1.3.- Definición del problema.

La Academia Mexicana de Ciencias (AMC), que se encuentra en Tlalpan, no cuenta con una conexión de red pública de agua, por lo que el abastecimiento se realiza mediante pipas. Dicho suministro es empleado para dar mantenimiento a las instalaciones en riego, limpieza, uso sanitario, bebida y preparación de alimentos.

En la AMC se consumen alrededor de 16 m³ de agua por semana habitualmente, lo cual es equivalente a dos pipas semanales que el programa delegacional "*Provisión Emergente de Agua Potable*" ha designado a la institución, el cual tiene un costo de \$70 por cada unidad. Sin embargo, hay ocasiones en las cuales se requiere de un mayor suministro debido a que la AMC realiza eventos, lo cual ocurre de 10 a 15 veces por año. Cuando esto sucede, la institución utiliza en promedio cuatro pipas, las cuales son suministradas por privados, cuyo costo oscila en \$500 por unidad, destinando para ello más de \$55,000 anualmente (Tlalpan, 2016).

Por otro lado, con el fin de cubrir la demanda de agua del AMC se cuenta con un sistema de captación de agua de lluvia, la cual es almacenada en una cisterna con capacidad de 42 m³. Dicho recurso sólo se usa exclusivamente para riego de áreas verdes y limpieza en general, ya que el personal que ahí labora desconfía de su calidad.

Es por ello que el siguiente trabajo plantea evaluar la calidad del agua captada para determinar un potencial aprovechamiento que genere una disminución en la inversión económica por parte de la AMC derivada del abastecimiento por privados de pipas de agua. Adicionalmente la relevancia en la implementación de dicho sistema dentro del recinto en cuestión de gestión y aprovechamiento integral del agua.

CAPITULO 2- MARCO TEORICO.

2.1.- Antecedentes.

2.1.1.- El agua en el mundo.

En el planeta se cuenta con alrededor de 1,400 millones de kilómetros cúbicos de agua, de los cuales el 97.5% es salada y el 2.5% corresponde a dulce. De hecho, cerca de tres cuartas partes que corresponden a un 68.7% del agua dulce disponible se encuentran en los glaciares y mantos de hielo, mientras que la subterránea corresponde a un 30% y las superficiales a un 0.4%. De ella, el 67.4% se encuentra en lagos de agua dulce, el 12.2% a humedad del suelo, el 9.5% a la atmósfera, el 8.5% en humedales, el 1.6% a ríos y el resto a plantas y animales como se muestra en la Figura 1 (SEMARNAT, 2015).

Del agua disponible para consumo humano, el 69% va dirigido al sector agropecuario, el 19% para el sector industrial y el 12% restante para el sector municipal, reflejando con ello la relevancia de contar con una buena gestión hídrica (Fondo para la

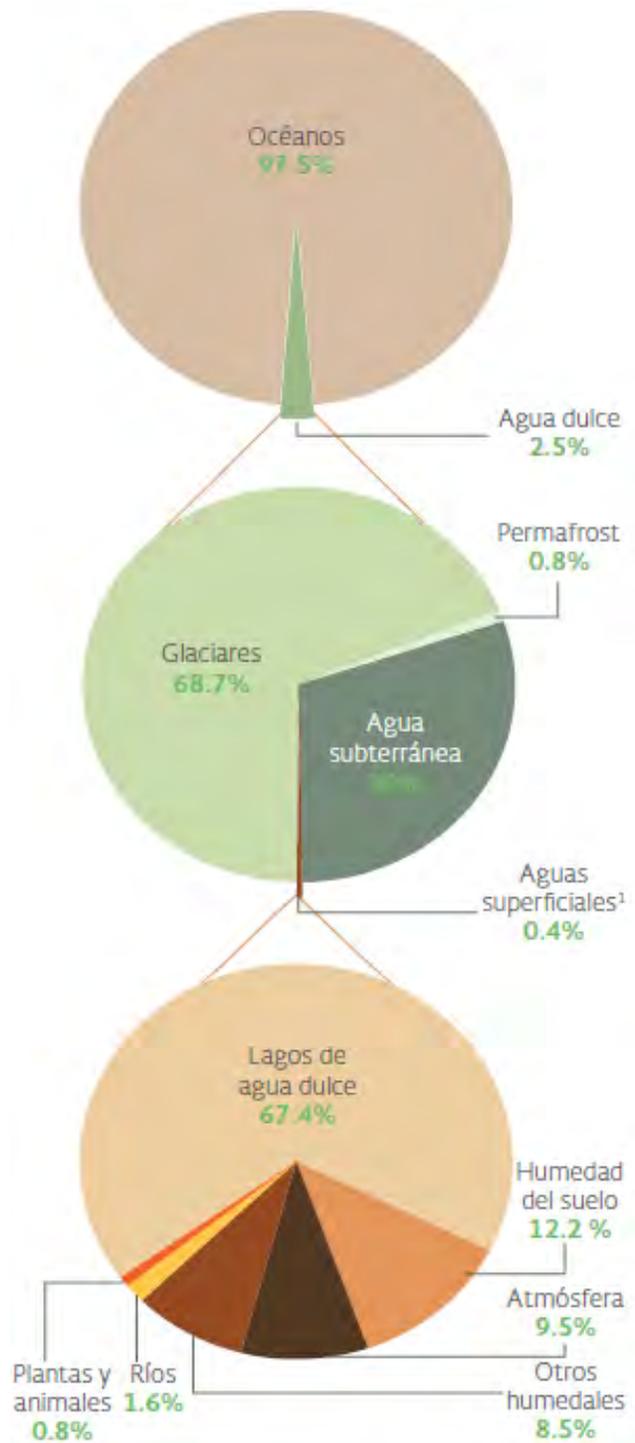


Figura 1.- Distribución del agua en el mundo.
Fuente: CONAGUA, 2015.

Comunicación y la Educación Ambiental, 2015).

Se estima que el 20% de los acuíferos mundiales son sobreexplotados, donde alrededor de 2,500 millones de personas dependen exclusivamente de los recursos de esta fuente para satisfacer sus necesidades básicas diarias (Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, 2015).

De las principales reservas acuíferas del mundo constituidas por yacimientos subterráneos (21 de 37) están disminuyendo, desde los ubicados en India y China, hasta los que se encuentran en Estados Unidos y Francia. Un caso importante es el ocurrido en la cuenca del Ganges², la cual presenta una tasa decrecimiento de 6.31 centímetros cada año debido a la población que lo sobredemanda para riego (BBC, 2017).

A nivel mundial 1,600 millones de personas viven en escasez absoluta de agua, 663 millones viven sin suministro de agua potable cercano a sus viviendas. De hecho, el 80% de las aguas residuales regresan a los ecosistemas sin ser tratadas, de las cuales 1,800 millones de personas hacen uso de estas aguas ocasionando la muerte de 842 mil personas al año (EXCELSIOR, 2017).

2.1.2.- Situación del agua en México.

El problema del agua en México inicia en la década de 1940 cuando la detonación de agua se incrementó por el paulatino proceso de urbanización derivado de la migración rural y de la política de industrialización de la época, el cual no podía ser cubierta debido a la carencia de infraestructura. Por lo anterior, se registró que el 62% de las 3.8 millones de viviendas con las que se contaban en ese año carecían de agua, invirtiendo así en dicho rubro. En el año de 1990, el censo registró que el 89.4% de la población urbana y el 51.2% de la rural contaban con la cobertura de

² Es uno de los grandes ríos del subcontinente indio, que fluye en dirección Este, desde el norte de la India cruzando la llanura del Ganges hasta Bangladésh.

agua potable (CONAGUA, 2008), mientras que para el 2015 ésta se elevó a 97.2% y 85%, respectivamente (CONAGUA, 2017).

Sin embargo, la población de México incrementa año con año, según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). En el año 2005 se registró una población de 103.3 millones de habitantes, donde actualmente se contemplan alrededor de 127.5 millones, donde el agua es cada vez más escasa principalmente por causas antropológicas, mala administración, hábitos y costumbres, contaminando y sobreexplotando así los recursos.

En México se cuenta con aproximadamente 633 kilómetros de longitud de ríos y arroyos (Figura 2), de los cuales destacan 51 ríos por los cuales fluye el 87% del escurrimiento superficial. De manera adicional cuenta con siete lagos principales, donde, el más grande es el lago de Chapala (Figura 3), cuya profundidad oscila entre los cuatro y seis metros. México cuenta con 653 acuíferos (Figura 4), de los cuales se reportan que existen 105 acuíferos sobreexplotados (CONAGUA, 2017).



Figura 2.- Ríos en México. Fuente: CONAGUA,2017.

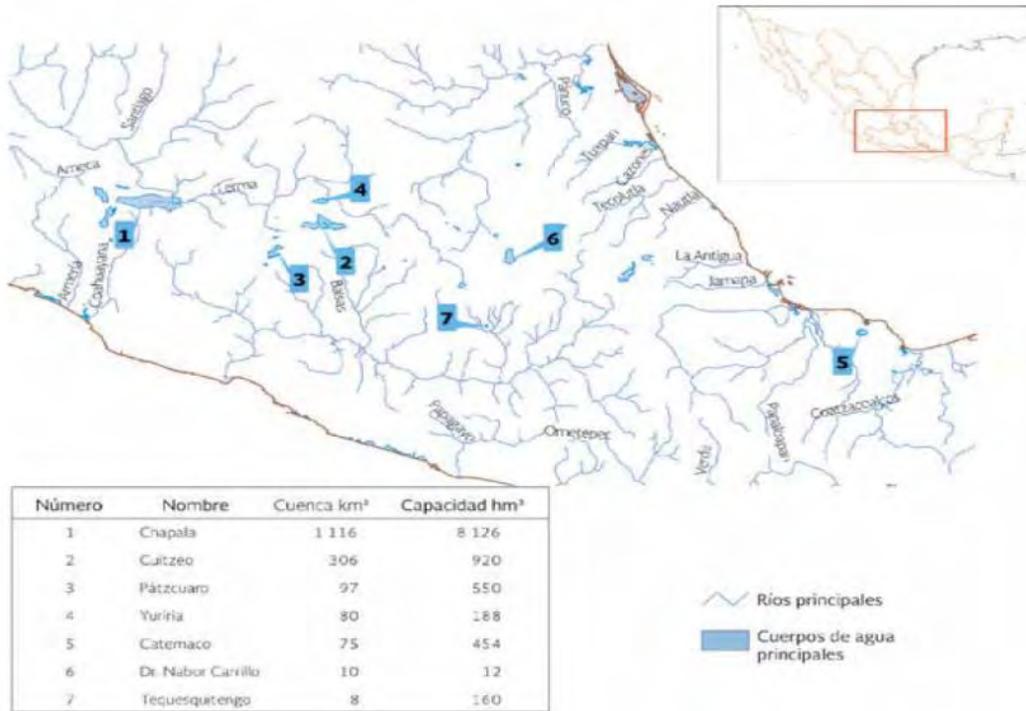


Figura 3.- Principales lagos en México. Fuente: CONAGUA, 2017.

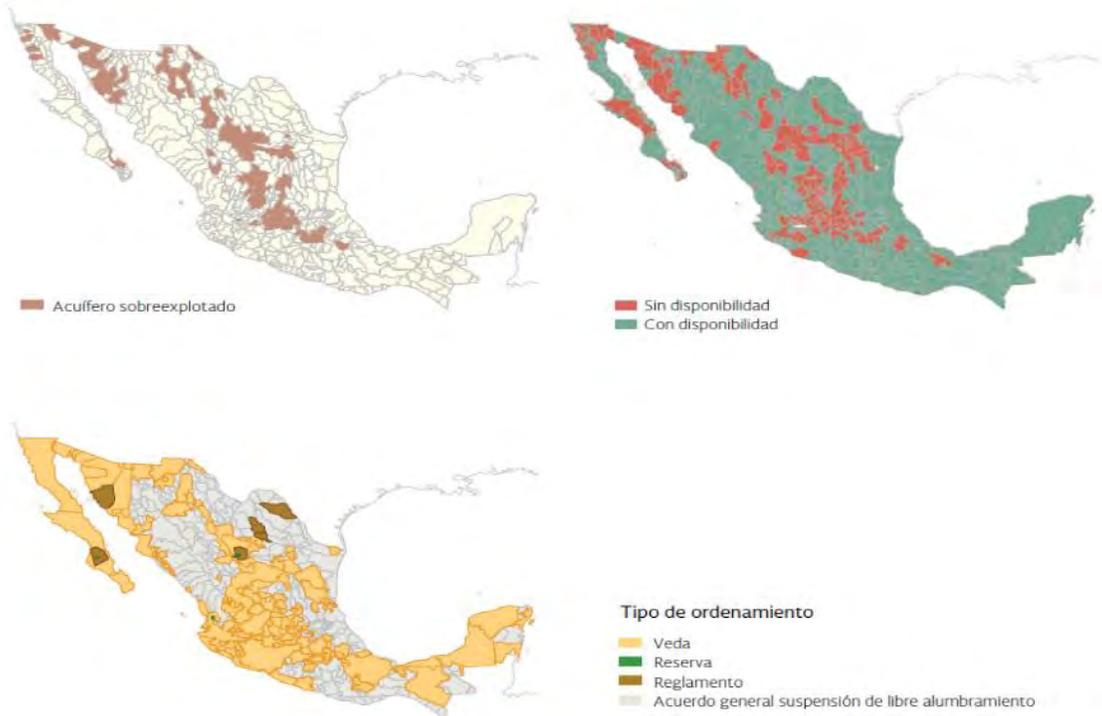


Figura 4.- Acuíferos en México. Fuente: CONAGUA, 2017.

No obstante, se registra que en el país hay 260 sitios clasificados como contaminados, localizándose principalmente dentro de las cuencas hidrológicas-administrativas³ del Valle de México, Balsas, Lerma-Santiago-Pacífico, Pacífico-Sur y Península de Baja California, correspondiendo al Río Lerma el caso más severo de contaminación por aguas residuales e industriales (Tinoco, 2016). Por otro lado, otro de ellos, pero por cianuros son los ubicados en la zona de Pachuca, ya que el agua de esta zona es muy usada para fines mineros (Tinoco, 2016).

En la mayor parte de México se presentan grandes precipitaciones⁴ anuales que en el 2016 alcanzaron 744 mm, tal como se muestra en la Figura 5, que representa la distribución de las precipitaciones en el país. Sin embargo no toda el agua pluvial se aprovecha, ya que de esta cantidad, el 72% se evapora y solo el 4% se recupera en aguas superficiales, 1.4% se escurre y el 11% se infiltra (CONAGUA, 2017).

³ Se cuentan con 13 regiones hidrológicas administrativas. El valle de México pertenece a la región 13.

⁴ La precipitación se mide en milímetros de agua, o litros caídos por unidad de superficie, es decir, la altura de la lámina de agua recogida en una superficie plana es medida en mm o l/m².

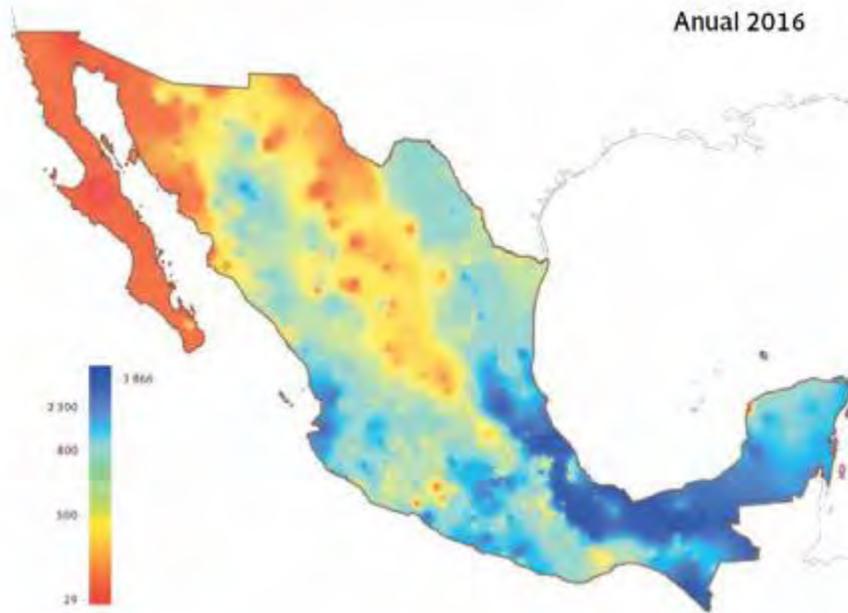


Figura 5.- Precipitación pluvial en México. Fuente: CONAGUA, 2017.

2.1.3.- Situación del agua en el Valle de México.

El Valle de México tiene una extensión territorial de 18,229 km², que comprende 121 municipios con una población reportada a mediados del año 2015 de 23.19 millones de habitantes (CONAGUA, 2016).

Las principales fuentes de agua del Valle de México son los acuíferos locales, embalses menores y trasvases desde otras cuencas. Estos en conjunto, aportan al Valle de México 81.9 m³/s de agua, de esta cantidad se le puede agregar 6.1 m³/s de agua de reúso dentro de la cuenca. En la Tabla 1 se muestra la distribución de agua para el abastecimiento del Valle de México (CONAGUA, 2013).

Tabla 1.- Distribución de las fuentes de abastecimiento al Valle de México. Fuente: BANCO MUNDIAL, 2013.

Fuente	Caudal	
	m ³ /s	%
Acuíferos locales	59.5	68
Acuíferos sostenibles	31.6	36
Acuíferos Sobreexplotados	27.9	32
Trasvases del sistema Cutzamala	14.7	17
Reúso de agua	6.1	7
Trasvases del sistema Lerma	4.8	5
Fuentes superficiales locales	2.9	3
Total	88	100

El abastecimiento del agua subterránea del Valle de México proviene de siete acuíferos que están mayormente clasificados como sobreexplotados, donde la zona del acuífero metropolitano de la Ciudad de México se encuentra con un déficit de 22.6 m³/s (Tabla 2) (CONAGUA, 2013).

Tabla 2.- Balance hídrico de los acuíferos locales que abastecen al Valle de México. Fuente: BANCO MUNDIAL, 2013.

Acuíferos	Recarga media anual	Descarga natural	Volumen concesionado	Disponibilidad/ déficit
	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
Zona Metropolitana de la Ciudad de México	16.3	0.0	38.9	-22.6
Cuautitlán-Pachuca	6.4	0.0	10.5	-4.1
Texcoco	5.1	0.3	6.3	-1.6
Apan	5	2.8	0.3	1.9
Soltepec	2.9	1.3	0.6	-1.1
Chalco-Amecameca	2.5	0.1	2.9	-0.5
Tecocomulco	0.9	0.0	0.0	0.8
Total	39.1	4.6	59.5	-25.0

El sistema Cutzamala, el cual aprovecha el agua de la cuenca alta del río del cual tomo su nombre, está conformado por las presas Tuxpan y El Bosque ubicado en

Michoacán; Chilesdo, Colorines, Ixtapan del Oro, Valle de Bravo, Valle Victoria ubicados en el Estado de México, la cual se inició su construcción en el año de 1982 (CONAGUA, 2005) para apoyar al sistema Lerma; que ya contaba con recursos hídricos agotados. Actualmente el sistema Cutzamala abastece a 11 alcaldías de la Ciudad de México y una docena de municipios del Estado de México, lo cual lo convierte en uno de los sistemas más importantes de abastecimiento en el país (CONAGUA, 2010). Sin embargo, el bombeo necesario para vencer el desnivel del sistema ocasiona un significativo consumo de electricidad, que en el 2008 se utilizó 1.29 TeraWatt por hora, cuyo costo fue de \$1,844 millones de pesos (BANCO MUNDIAL, 2013). No obstante, se estima que para el año 2030 sólo se podrá cubrir el 50% de la demanda total del Valle de México, tal como lo muestra la Tabla 3.

Tabla 3.- Proyección de población del Valle de México. Fuente: Banco Mundial, 2013.

AÑO	Población del Valle de México	Demanda de agua en el Valle de México (m³/s)
2020	23,528,248	66.8
2030	29,051,481	91.8

De hecho, se piensa que de no implementar un adecuado sistema de gestión hídrica a la brevedad se cubrirá la demanda a través de la sobreexplotación de acuíferos en un 23%, aunque a costos muy superiores que los actuales, mientras que el 27% resultaría de fuentes alternas aun no establecidas en el país (BANCO MUNDIAL, 2013). Dichas estimaciones proyectan una demanda del 91.8 m³/s de una actual del 66.8 m³/s, así como un déficit total de 46.2 m³/s, que corresponde a lo doble de lo que actualmente se contempla (BANCO MUNDIAL, 2013).

2.2.- Sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL).

2.2.1.- SCALL en el mundo.

En la actualidad, los SCALLs constituyen una alternativa para el suministro de agua, posicionándose como una tecnología cada vez más utilizada, principalmente en países con restricción de recursos hídrico. Un ejemplo lo constituye Zambia⁵, donde a los residentes se les capacita para construir tanques de almacenamiento, otro son las casas grandes en Suecia, los hoteles en Hong Kong y las escuelas en Taiwán (CONAMA10, 2012).

En un estudio reportado por Eroksuz y Rahman (2012) en tres ciudades en Australia se encontró que el agua potable que se emplea anualmente se obtiene mediante el almacenamiento del agua de lluvia representa un 21-57%, empleando tanques que van desde 10 m³ hasta 100 m³. En Japón, cuentan con áreas de captación tan grandes como un estadio, donde el agua de lluvia permite un ahorro de cerca \$120,000 USD y un suministro del 65% de la demanda de agua no potable (Souza y EneDir, 2012). En el Reino Unido se examinó el uso del agua de lluvia para baños, instalando un tanque de un poco más de 2 m³ en una casa. El sistema fue monitoreado por 12 meses, obteniendo que el intervalo de ahorro fue del 4% en junio al 100% en septiembre (Leite Souza y Ghisi, 2012). En Alemania, cada año se incorporan 50 mil SCALLs como parte de su política pública, ya que la oferta de agua crece al ritmo de las aglomeraciones urbanas, utilizando cubiertas en edificios, calles y vías peatonales (CONAMA 10, 2012). En Bangladesh, se han instalado alrededor de 1,000 SCALLs por parte de organizaciones no gubernamentales utilizando tanques de concreto reforzado y de mampostería con un costo variante de \$50 y \$150 USD (CONAMA 10, 2012). En Estados Unidos de América son utilizados en 15 estados del país, siendo Texas el estado donde más se utilizan, encontrando alrededor de 50 compañías especializadas en el diseño de SCALLs (CONAMA10, 2012).

⁵ Es un país al sur de África, con un terreno escabroso y fauna diversa

Por otro lado, Jordania es una ciudad que tiene muchos problemas por la escasez de agua, que aunado a una precipitación pluvial anual promedio de 300 mm conlleva a la implementación de un SCALL. Se concluyó que el potencial de ahorro agua potable con el uso del agua de lluvia tiene un rango del 0.27% al 19.7% en los 12 estados de la ciudad (Leite Souza y Ghisi, 2012). En Polonia se analizó la factibilidad del uso del sistema de agua de lluvia en el sector residencial de la ciudad empleando la simulación de modelos que estiman el potencial de ahorro de agua potable por las condiciones climatológicas y la demanda de los lugares. En esta investigación, se concluyó que el periodo de retorno es muy alto, considerando los costos de la operación y de inversión cuando es comparado con el precio a pagar por el suministro regular de agua (Leite Souza y Ghisi, 2012).

Otro caso de estudio realizado en Grecia, donde el agua subterránea es escasa o salina y no es apta para beber, muestra que la situación empeora en el verano, cuando la población se multiplica debido al turismo y el agua subterránea decrece. Por lo que se optó por un SCALL como solución para cubrir la demanda de 13 comunidades, construyendo 23 tanques de almacenamiento de ferroconcreto. El almacenamiento de agua proviene de fuentes subterráneas o la mezcla de agua subterránea y del agua de lluvia, dependiendo de la temporada (Alexopoulos, *et al.*, 2007), solucionando así la problemática local.

2.2.2.- SCALL en México.

Al igual que en otras partes del mundo, México está usando esta alternativa para la solución del déficit de agua que se tiene, por ejemplo, las 33 hoyas de agua construidas en Chiapas con capacidad de 1,000 m³ cada una, ubicados en 26 localidades indígenas de los municipios de: Amatenango del Valle, Chamula, Chenalhó, Huixtán, Las Rosas, Larráinzar, Oxchuc, Salto de agua, San Cristobal de las Casas, Tenejapa y Zinacantán. Con estas acciones se beneficiaron a 15,300 habitantes de los cuales 9,180 son mujeres y 6,120 hombres.

En la comunidad de Cherán, en Michoacán, se instaló un sistema de captación pluvial, el cual tiene una capacidad de 20,000 m³, la hoya cuya área de captación

es de 16,000 m² abastece a una planta purificadora para envasar garrafrones con una capacidad de 1,000 garrafrones por día.

En el gobierno existe un programa llamado “*Programa Nacional para Captación de Agua de Lluvia y Ecotecnias en Zonas Rurales*” abreviado como PROCAPTAR, cuyo objetivo es dotar de agua a la población rural de México. No obstante, en ella existen diversas dificultades técnico-económicas para ser abastecidos mediante formas tradicionales⁶, ya que sus condiciones se tipifican como de alta y muy alta marginación. De igual manera, que presenten lluvias anuales acumuladas iguales o mayores a 1,500 mm, y que además se encuentren dentro de la Cruzada Nacional Contra el Hambre para las cuales el apoyo del programa es de hasta el 100% para la instalación de un SCALL con fines de abasto de agua potable a nivel familiar por vivienda, el cual permite almacenar alrededor de 50 litros por persona al día (CONAGUA, 2017).

En la Ciudad de México, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) colabora con el gobierno de la ciudad para dotar de agua potable a la ciudadanía con SCALLs. El mandatario de la ciudad señaló que en el 2016 se instalaron 474 SCALLs conocidos como *tlaloques*⁷ y se destinaron recursos para la colocación de SCALLs para cinco unidades habitacionales. El secretario general de la UNAM, indicó que este modelo ya es replicado en ocho municipios de Oaxaca, Puebla y Tlaxcala (Roa, 2017).

⁶ Se entiende como formas tradicionales a sistemas de bombeo, redes de distribución, etc.

⁷ *Tlaloque* proviene de la mitología mexicana, los cuales son los ayudantes de Tláloc encargados de repartir la lluvia por la tierra en vasijas que dejaban caer según las necesidades de la tierra para asegurar una cosecha prospera, y cuando estos chocaban sus vasijas y se rompían se generaban los rayos.

2.2.3.- Componentes de un sistema de captación de agua de lluvia.

La Figura 6 muestra los principales componentes de un SCALL.

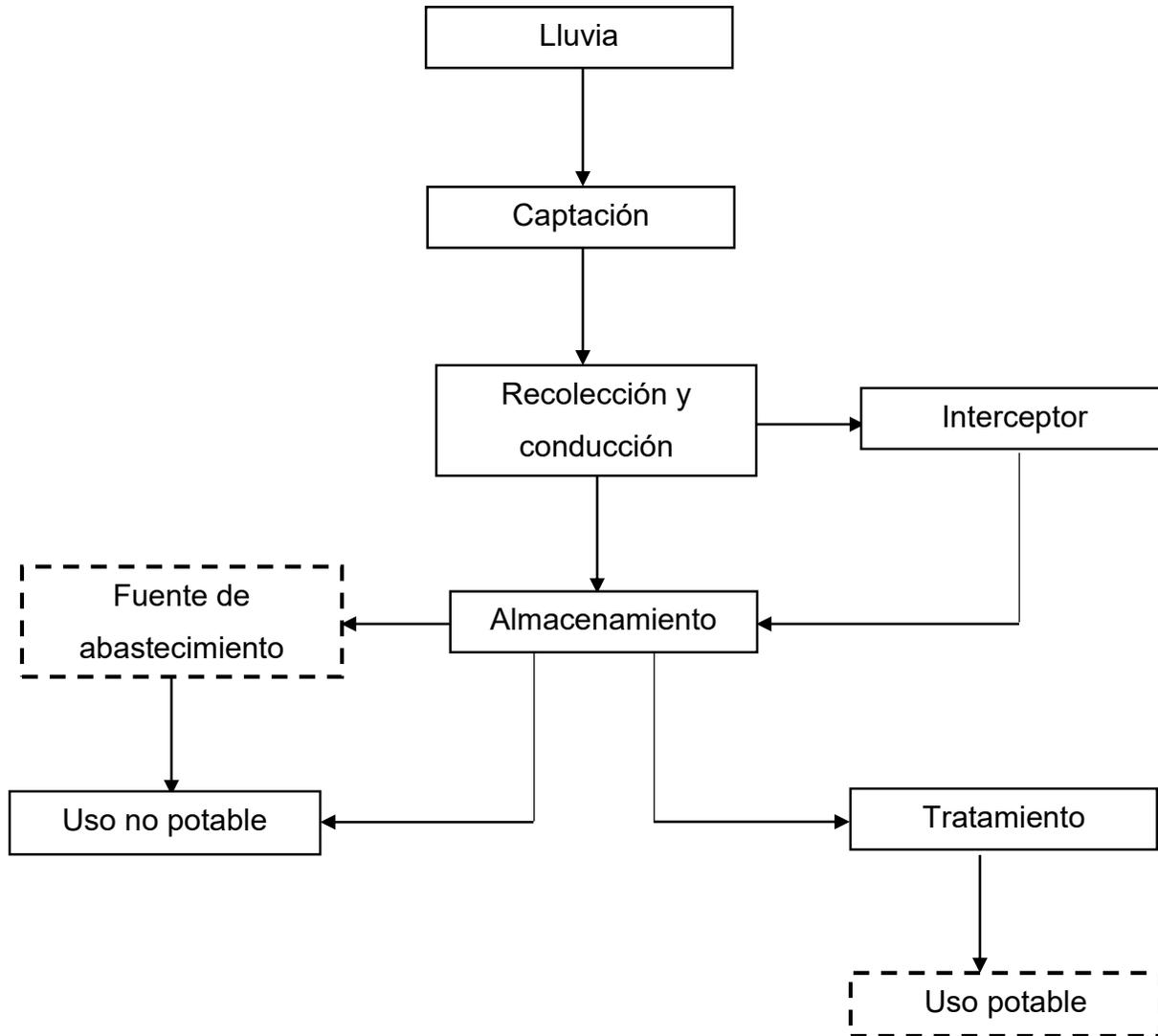


Figura 6.- Esquema de los principales componentes de un SCALL.

A continuación, se describen los componentes mencionados en la Figura 6:

Captación: se conforma por el techo de la edificación, el mismo que deberá contar con pendiente (mínima de 1%) y superficie adecuadas para que facilite el escurrimiento del agua de lluvia. Los materiales empleados para este tipo de

sistemas pueden ser: la plancha metálica ondulada, tejas de arcilla, paja, por mencionar algunos. (Mechell, *et al.*, 2010).

La plancha metálica es liviana y de fácil instalación, pero puede ser costosa y difícil de encontrar en algunos lugares. Por otro lado, las tejas de arcilla tienen una superficie adecuada y suelen ser más baratas, pero resultan ser pesadas y de manera adicional se debe contar con una estructura resistente, mientras que la paja por ser de origen vegetal tiene la desventaja de liberar lignina⁸ y taninos⁹, lo que le da tonalidad amarilla al agua, disminuyendo así sus propiedades de calidad visual (Mechell, *et al.*, 2010).

Es importante tomar en cuenta que para consumo humano no se deben usar techos que contengan recubrimientos de asbesto, cobre, zinc o componentes de asfalto, ni que hayan sido pintados con productos fabricados con plomo (Mechell, *et al.*, 2010), ya que estos resultan tóxicos.

Recolección y Conducción: está conformado por las canaletas que van adosadas en los bordes más bajos del techo, en donde el agua tiende a acumularse antes de caer al suelo (Mechell, *et al.*, 2010).

El material de las canaletas debe ser liviano, resistente al agua y fácil de unir entre sí, a fin de reducir las fugas. No obstante, se pueden emplear materiales alternativos, como el bambú, madera, metal o PVC, entre otros. En el caso de las primeras aguas, es necesario contar con un dispositivo de descarga, ya que estas constituyen una fuente de contaminación para el sistema, debido al arrastre de materiales a su interior (Mechell, *et al.*, 2010).

Interceptor: conocido también como dispositivo de descarga de las primeras aguas provenientes del lavado del techo. Este dispositivo impide que el material indeseable

⁸ Es una clase de polímero orgánico complejo que forma materiales estructurales importantes en los tejidos de soporte importantes en los tejidos de plantas vasculares y algunas algas.

⁹ Sustancia muy astringente, que se extrae de la corteza de algunos árboles, como el castaño o el roble y se emplea principalmente en el curtido de pieles.

ingrese al tanque de almacenamiento y de este modo minimizar la contaminación del agua almacenada. Su diseño se debe tomar en cuenta el volumen de agua requerido para lavar el techo y que se estima en 1 litro por m² de techo (Mechell, *et al.*, 2010).

Almacenamiento: es la obra destinada a almacenar el volumen de agua de lluvia necesaria para el consumo diario, en especial durante el periodo de sequía. La unidad debe ser duradera. Los tipos de tanques de agua de lluvia que pueden ser empleados en el medio rural pudieran ser construidos de mampostería¹⁰ para volúmenes menores de 100 hasta 500 litros, también se puede emplear ferrocemento o concreto para cualquier volumen (Mechell, *et al.*, 2010).

Tratamiento: es necesario que el agua destinada al consumo directo de las personas sea tratada antes de su ingesta. El tratamiento debe estar dirigido a la remoción de las partículas que no fueron retenidas por el dispositivo de intercepción de las primeras aguas, y en segundo lugar al acondicionamiento bacteriológico. Se puede dividir en un pre-tratamiento, empleando filtro de arena y la fase de desinfección, que puede ser la desinfección con cloro, lámparas UV o carbón activado impregnado con plata. (Mechell, *et al.*, 2010).

Otros accesorios: este se refiere a los grifos y tuberías de conducción del agua tratada, hacia los lugares donde será empleado (Mechell, *et al.*, 2010).

En la Figura 7 se muestra una infografía sobre las partes que componen el SCALL.

¹⁰ Procedimiento de construcción en que se unen las piedras con argamasa sin ningún orden de hiladas o tamaños.



Figura 7.- Diagrama de los componentes de un SCALL. Fuente: Organización Panamericana de la Salud, 2010.

2.2.4.- Efecto del material del techo en la calidad de un SCALL.

La calidad del agua de un SCALL es de gran importancia, ya que el propósito de estos sistemas es para el uso doméstico. No obstante, contaminantes químicos se han encontrado en los SCALLs, tales como metales pesados, pesticidas y herbicidas. Además, están presentes microorganismos en el escurrimiento del techo de tipo fecales y algunas otras de otro origen, aunque potencialmente patógenas (Mendez, *et al.*, 2011).

El tipo de material en el techo puede afectar a la calidad, en un estudio realizado en Austin, Texas, se compararon batido de cedro, metal galvanizado, teja de asfalto, y

dos tipos de madera verde y tratada, donde estos últimos produjeron altas concentraciones de cobre, mientras que el metal galvanizado produjo altas concentraciones de zinc. De manera adicional se encontraron partículas de cadmio y los techos de teja asfáltica pueden ser fuente de partículas de plomo y potencialmente de mercurio (Mendez, *et al.*, 2011).

2.2.5.- Mantenimiento de un sistema de captación de agua de lluvia.

La falta o el incorrecto mantenimiento de un SCALL pueden resultar en una baja calidad del agua, así como el incremento del riesgo a la salud. Cada sistema es único y tiene su propia variación en su estructura y funcionamiento. En general el mantenimiento de un sistema de éste tipo es:

Canaletas: estas se deben inspeccionar después de una intensa tormenta que incluya grandes ráfagas de viento. Al menos una vez al año, estas deben limpiarse con agua a presión para eliminar los sedimentos y residuos depositados en esquinas, transiciones y perchas internas. Es importante ser cuidadoso durante el mantenimiento a las canaletas, ya que dicha actividad corresponde a una maniobra aérea (Mechell, *et al.*, 2010).

Se deben inspeccionar las pantallas para hojas y los filtros en las canaletas mensualmente, así como después de finalizar la temporada de lluvias, especialmente cuando se combina con vientos fuertes. Las inspecciones y limpieza no frecuentes provocan obstrucciones, desperdicio de agua y mayores posibilidades de que los desechos en descomposición eventualmente ingresen al tanque de almacenamiento (Mechell, *et al.*, 2010).

Bajadas de agua: estas deben inspeccionarse regularmente en búsqueda de escombros, obstrucciones de flujo, las bajantes de PVC sin pintar se deben inspeccionar para detectar el crecimiento de algas, fugas y grietas.

Estos dispositivos son trampas naturales de sedimentos y materia orgánica, por lo cual su inspección debe ser semanal. No obstante, es sugerido realizar una limpieza mensual; dependiendo el volumen de residuos encontrados (Mechell, *et al.*, 2010).

Tanques de almacenaje: deben ser inspeccionados mensualmente o con mayor frecuencia si se repararon, rompieron u obstruyeron una pantalla de desechos o un dispositivo de lavado. Se debe hacer lo mismo para localizar signos de intemperización o uso, tales como grietas, erosión y sedimentación. Asimismo, las losas de concreto deben inspeccionarse anualmente, mientras que para las bases de tierra se tiene que efectuar dicho procedimiento cada mes (Mechell, *et al.*, 2010).

Tuberías y conexiones: deben verificarse mensualmente. Los tubos de plástico deben revisarse en búsqueda de grietas y deformaciones. Por otro lado, el polímero de PVC que está expuesto a la luz solar puede sufrir de intemperización, tornarse de color amarillento y volverse frágil (Mechell, *et al.*, 2010).

2.2.6.- *Ventajas y desventajas de un SCALL.*

El empleo de los SCALLs trae sus ventajas y desventajas, las cuales se mencionan en la Tabla 4:

Tabla 4. Ventajas y desventajas en el empleo de los SCALLs.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Fácil mantenimiento	Sólo se puede aplicar en lugares donde se presentan grandes cantidades de precipitación en la zona (> 1000 mm/año)
Empleo de mano de obra y materiales locales	
Escasos o nulo consumo de energía	Puede presentar un elevado costo de inversión para familias que cuentan con bajos recursos (se requiere de apoyo gubernamental para el arranque)
Facilidad para su construcción	
Bajo mantenimiento y operación	El agua se puede contaminar, por materia orgánica o por sustancias que contengan el techo, por lo cual se debe pasar por un sistema de purificación para que sea seguro de ingerir
Alta calidad fisicoquímica del agua de lluvia	

2.2.7.- Bases de diseño para un sistema de captación de agua de lluvia.

Para determinar si la instalación de un SCALL y escurrimientos pluviales es factible en una edificación, se debe realizar los análisis establecidos por la NMX-AA-164-SCFI-2013 “Edificación sustentable-criterios y requerimientos ambientales mínimos” (Diario Oficial de la Federación, 2013).

Para obtener la precipitación anual promedio se debe recopilar información pluviométrica de la zona de por lo menos 10 años, ésta se calcula con la siguiente Ecuación 1 (Cálculo de la precipitación anual promedio).

$$\bar{p} = \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{n} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

\bar{p} = Precipitación promedio anual con distribución mensual, en mm.

p_i = Precipitación en el año “i”, en mm.

n= Número de años.

Para la obtención del volumen anual promedio, se obtiene mediante la siguiente Ecuación 2 (Cálculo del volumen anual promedio):

$$V_A = \frac{\bar{p} * A * k_e}{1000} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

V_A = Volumen promedio de captación anual, en m³.

\bar{p} = Precipitación promedio anual, en mm.

A= Área de la proyección horizontal de las instalaciones de captación, en m².

k_e = Coeficiente de escurrimiento de acuerdo al material de las instalaciones de captación, adimensional. Los valores se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5.- Coeficientes de escurrimiento por el tipo de material. Fuente: MNX-AA-164-SCFI-2013.

Material o tipo de construcción	Ke
Cubiertas metálicas o plásticas.	0.95
Techos impermeabilizados o cubiertos con materiales duros (p. ej. Tejas)	0.9
Concreto hidráulico	0.9
Calles asfaltadas	0.85
Lámina corrugada	0.8
Adoquinado o empedrado con cemento	0.75
Terrazas	0.6

Para la obtención de la demanda de agua anual con distribución de la vivienda, de acuerdo al uso asignado al recurso (excusados, aseo personal, etc), se utiliza la Ecuación 3 (Cálculo de la demanda de agua anual):

$$DA = \frac{Ca * Ov * Dm}{1000} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

DA= Demanda de agua mensual de la vivienda, en m³/mes.

Ca= Consumo de agua, en l/hab/día.

Ov= Ocupación de la vivienda, en hab/vivienda.

Dm= Días del mes, en días.

Para calcular el volumen de funcionamiento del tanque, se utiliza la Ecuación 4 (Cálculo del volumen del tanque de almacenamiento):

$$Alm_n = Alm_{n-1} + V_A - DA \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

Alm_n= Volumen de almacenamiento mensual en el tanque, en m³.

Alm_{n-1}= Volumen de almacenamiento en el tanque del mes anterior, en m³.

V_A= Volumen promedio de captación anual, en m³.

DA= Demanda de agua mensual de la vivienda, en m³/mes.

2.2.8.- Normatividad.

El marco jurídico que determina los límites máximos permisibles en la calidad del agua para su consumo en los Estados Unidos Mexicanos es la 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”*. Esta norma establece los límites de cada uno de los indicadores de calidad que necesita tener el agua para su consumo, donde todos los tratamientos de potabilización de agua para consumo humano deben cumplir con la norma, ya sean públicos y privados. El cumplimiento es de carácter obligatorio en todo el territorio nacional.

La norma consiste de 46 parámetros para la determinación de la calidad de agua para el consumo, de los cuales se tomaron 8 parámetros para este proyecto, considerando el tipo de material empleado en el SCALL, así como la ubicación de la institución y los posibles contaminantes por deposición atmosférica.

A continuación, se muestran los LMP, en la Tabla 6, que son de importancia para este estudio, las cuales fueron separadas por características físicas, químicas y biológicas.

Tabla 6.- Límites permisibles de contenido de parámetros físico-químicos y biológicos. Fuente: NOM-127-SSA1-1994.

Parámetros	Límites Máximos Permisibles
Químicos	
Dureza total	500 mg de CaCO ₃ /l
pH	6.5-8.5 en unidades de pH
Físicos	
Color	20 unidades de color verdadero en la escala platino-cobalto
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultado de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico)
Turbiedad	5 NTU o su equivalente en otro método
Sólidos disueltos totales (SDT)	1000 mg/l
Biológicos	
Organismos Coliformes Totales	0 UFC ¹¹ /100ml
<i>E. Coli</i> o coliformes fecales	0 UFC/100ml

2.3.- Usos del agua de lluvia.

El empleo de los SCALLs, es una buena opción ya que se puede ahorrar un 50% del uso de agua en promedio en una casa, donde el agua captada sin tratamiento de potabilización puede ser utilizada en diversas actividades, como el uso en el WC, el empleo en las lavadoras, la limpieza en general y el riego de plantas. Además, en general el agua de lluvia se encuentra libre de cloro y de manera adicional no cuenta con altas concentraciones de dureza, por lo cual se podría hacer un ahorro en el

¹¹ Unidad Formadora de Colonias, es la unidad que se emplea para cuantificar microorganismos.

empleo de detergentes y suavizante (el aumento de estos parámetros se deriva del mantenimiento del sistema).

Para hacer usos como fuente de abastecimiento humano, el agua de lluvia debe de cumplir con los valores que establece la normatividad, por lo cual, es necesaria una serie de estudios para determinar su calidad o su potencial de empleo y así poder definir un sistema de potabilización, para su consumo y evitar enfermedades causadas por ingesta de agua contaminada.

La calidad del agua de lluvia puede variar a lo largo del periodo en el cual estará almacenada. Sin embargo, dicha variación dependerá del mantenimiento que se le dé al sistema tanto de captación, distribución y almacenamiento.

CAPITULO 3.- METODOLOGÍA

3.1.- Zona de estudio.

3.1.2.- Climatología.

Dentro de la delegación se presentan cinco subtipos de climas, el templado subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad en el 32.32% de la superficie, el templado subhúmedo con lluvias en verano de humedad media en el 6.39% del territorio, el templado subhúmedo con lluvias en verano de menor humedad en el 0.33%, el semifrío húmedo con abundantes lluvias en verano en el 17.17% del territorio y, en el restante 43.79% se presenta un clima semifrío subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad (SEDESOL, 2011), en la Figura 8 se muestra la distribución de la alcaldía.

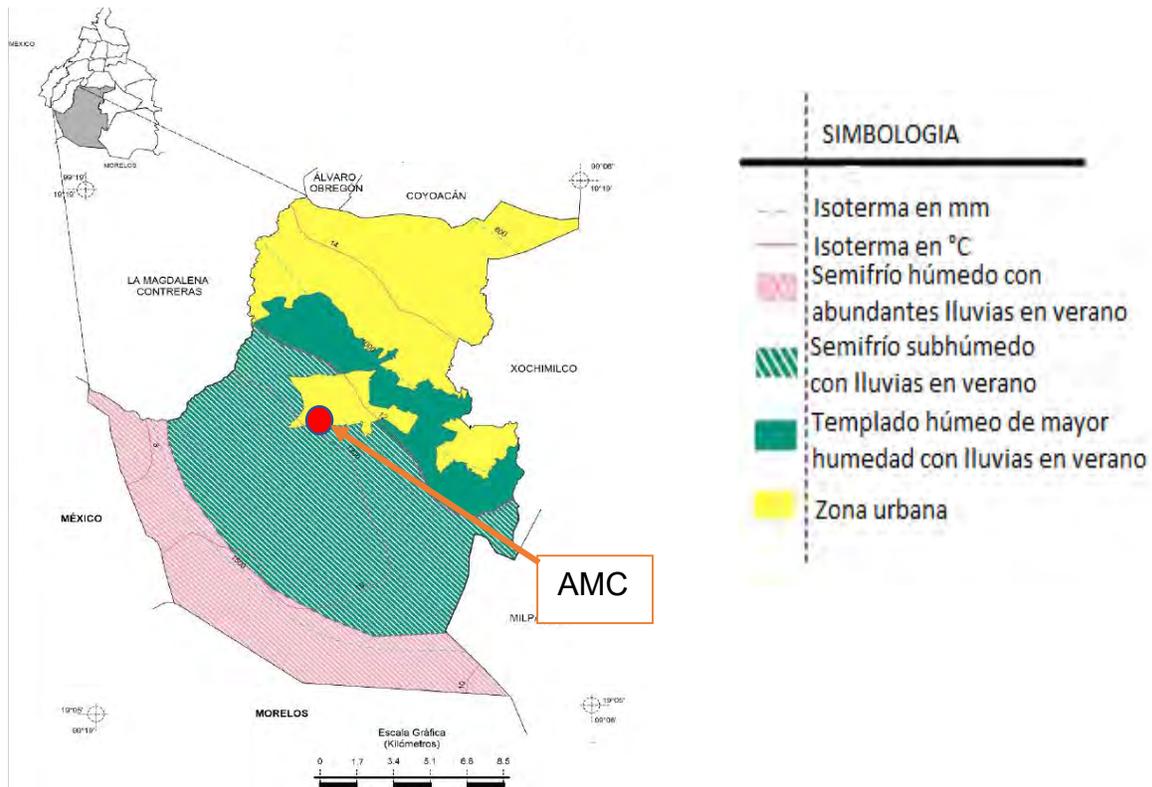


Figura 8.- Climatología de Tlalpan y ubicación de la AMC. Fuente: INEGI, 2005. Prontuario de Información Municipal de los Estados Unidos Mexicanos

3.1.3.- Situación del agua potable en la zona.

Tlalpan tiene una precipitación promedio de 1,200 mm anuales. La delegación forma parte de tres regiones hidrológicas: Lerma-Santiago, Balsas y Pánuco. La red hidrológica en la alcaldía se caracteriza por el predominio de corrientes intermitentes¹² que forman su caudal durante la temporada de lluvias y que se alimentan de las corrientes de agua que bajan de las elevaciones de las sierras.

Sin embargo, Tlalpan sufre de escasez de agua, principalmente en la zona del Ajusco Medio y de los pueblos originarios de Tlalpan¹³ debido a la baja presión con la que se distribuye el líquido del sistema Cutzamala, asimismo por la falta de mantenimiento a tuberías. Por ello, la delegación Tlalpan repartió 1, 200,000 m³ de agua en pipas a través del programa Provisión Emergente de Agua Potable durante el 2016.

3.1.4.- Academia Mexicana de Ciencias (AMC).

El sistema de captación utilizada en el estudio se localiza en la alcaldía (antes delegación) de Tlalpan, cuyo nombre proviene de dos palabras de origen náhuatl: “*tlalli*” y “*pan*”, que significan “*tierra*” y “*sobres*”, respectivamente. Por esa razón se traduce como “*lugar de tierra firme*”. Ella cuenta con una densidad poblacional de 2,085 hab/km² y una superficie de 312 km² (CDMX, 2016). En la Tabla 7 se muestra la geomorfología de la delegación Tlalpan:

¹² Corrientes de agua que se presentan en temporada de lluvia y sólo ciertos periodos de retorno

¹³ Pueblos originarios de Tlalpan, están conformados por: San Lorenzo Huipulco, San Agustín de las Cuevas Tlalpan, San Pedro Mártir Texopalco, San Andrés Totoltepect, San Miguel Xicalco, San Miguel Ajusco, Santo Tomás Ajusco, San Miguel Topilejo Santa María Magdalena Petlacalco, Santa Úrsula Xitla, Chimalcoyoc, y Parres el Gurada.

Tabla 7.- Geomorfología de la Alcaldía de Tlalpan. Fuente: SEDESOL, 2011.

Formación	% del territorio
Sierra escudo volcán	41.8
Sierra Volcánica de laderas escarpadas	20.35
Lomerío con cañada	9.43
Llanura aluvial	9.93
Llanura lacustre	7.72
Meseta basáltica malpaís	5.21
Sierra volcánica con estrato volcánico	3.84
Lomerío	1.33
Llanura lacustre salina	0.39

La ACM se localiza en la calle Ciprés s/n, en la colonia de San Andrés Totoltepec en Tlalpan en la Ciudad de México. El lugar tiene las siguientes coordenadas geográficas; latitud 19° 14' 30.92" N y de longitud: 99° 10' 26.42" O. En La Figura 9 se muestra la localización de la ACM.



Figura 9.- Localización de la ACM. Fuente: Google Earth 2018.

3.1.5.- Sistema de captación de agua de lluvia de la Academia Mexicana de Ciencias.

A continuación, se muestran los componentes del SCALL de la AMC.



Figura 11.- Techo de la AMC utilizado para la captación de agua de lluvia.



Figura 10.- Aperturas de la azotea para la conducción del agua de lluvia.



Figura 13.- Rejillas para la detención de sólidos.

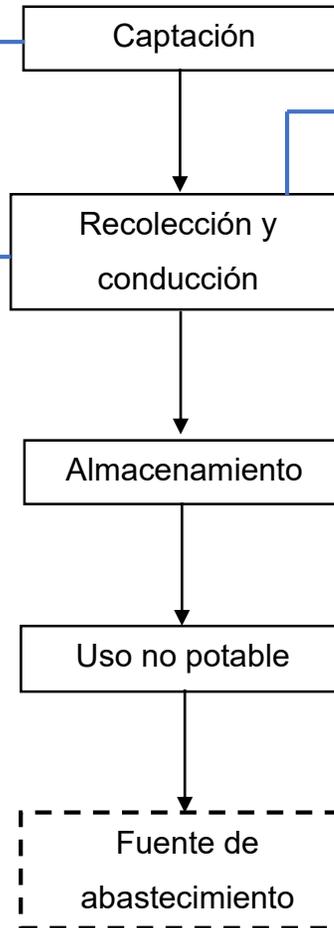


Figura 12.- Cisterna de almacenamiento de agua de lluvia.

El techo utilizado como superficie de captación de la AMC tiene un área de 1,752.23 m², cubierta en su mayoría por láminas metálicas inclinadas para favorecer el escurrimiento del agua (Figura 10).

El techo mostrado en la Figura 11 se evidencian las aperturas que conducen el agua hacia los ductos de PVC interiores, los cuales cuentan con rejillas gruesas para evitar el paso de sólidos de gran tamaño, que pudiesen azolvar el sistema (Figura 12). Los responsables de la institución comentaron que la limpieza de la azotea se efectúa de manera periódica, al igual que la impermeabilización, donde mencionan que el no existir árboles de gran tamaño en la cercanía hace que la zona se mantenga libre de residuos vegetales.

Una vez captada el agua, es transportada mediante ductos de PVC que se encuentran dentro de los muros del auditorio, siendo imposible modificar la red de conducción o verificar el estado de los ductos, sin tener que dañar el muro.

El sistema de almacenamiento consta de un depósito de 42 m³ de almacenamiento para la captación de agua de lluvia donde el agua sólo es contenida. De manera adicional, la institución cuenta con una cisterna exterior de 30 m³ de capacidad (Figura 13), la cual es usada para el riego de las plantas y para su uso en la limpieza del patio del auditorio. La AMC cuenta además con una cisterna de 130 m³ donde se recolecta el agua potable que es utilizada para el abastecimiento hacia las distintas instalaciones de la AMC.

3.2.- Cálculo de captación de agua de lluvia considerando área de la AMC.

Para determinar el potencial de captación de agua de lluvia se utilizó la Ecuación 2, mencionada en el subcapítulo 2.2.7. Para dicho cálculo se tomó como referencia un período de 10 años (2005-2015). Para obtener los valores de precipitación promedio mensual los datos fueron obtenidos de la estación 9004-CALVARIO 61 de la base de datos de CLICOM.

Para este cálculo todos los datos son conocidos, el área de captación (A) es de 1752 m², el coeficiente de escurrimiento k_e se fijó en 0.8, ya que el material utilizado es

lámina corrugada y la precipitación mensual promedio es la que se muestra en la Figura 14.

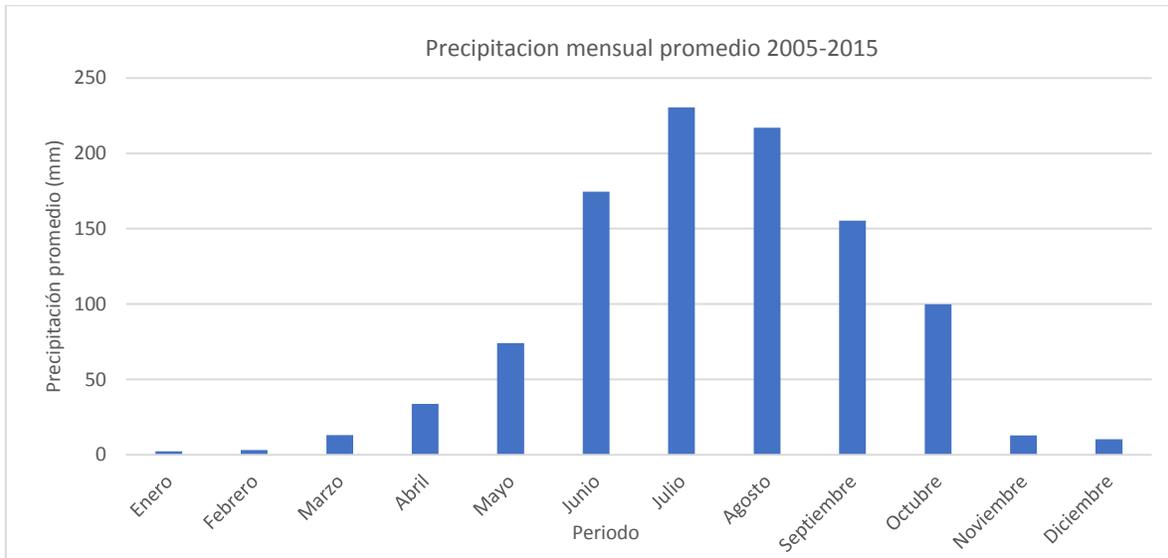


Figura 14.- Precipitación mensual promedio. Fuente: Elaboración a partir de los datos climáticos de CLICOM a través de su plataforma web del CICESE (<http://clicom-mex.cicese.mx>).2018.

En la Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos en el cálculo de la captación de agua de lluvia mensual promedio.

Tabla 8.- Captación de agua de lluvia mensual promedio. Fuente: Elaboración propia con datos de CLICOM,2018.

Temporada	Mes	Volumen de captación mensual promedio (m ³)
Lluvia	Julio	341.5
	Agosto	309.2
	Septiembre	217.8
	Octubre	140.0
Estiaje	Noviembre	18.2
	Diciembre	14.6
	Enero	3.2
	Febrero	4.6
	Marzo	18.3
	Abril	47.3
Lluvia	Mayo	115.8
	Junio	256.0

Con la suma de los volúmenes de captación mensual promedio, se puede obtener el volumen de captación promedio anual el cual es igual a 1,486 m³ de agua que la AMC puede ofertar.

Aunque la demanda de agua en la institución no es constante durante el año se requiere de 16 m³ de agua para realizar las actividades cotidianas, dentro de las cuales se encuentran limpieza, preparación de alimentos, riego y bebida. En la AMC se laboran 46 semanas al año y seis semanas de descanso, de las cuales tres se efectúan entre julio y agosto, mientras que las restantes ocurren entre diciembre y enero.

En la AMC se labora de lunes a viernes en un horario normal (7:00 a 22:00) con un consumo de 2.8 m³, los sábados se labora solamente medio día (7:00 a 2:00) con un consumo de 1.4 m³, además de un consumo de 0.6 m³ para los domingos y días de descanso (que establece la SEP).

Se realizan de manera anual alrededor de 12 eventos con duración de uno a dos días, siendo la temporada donde más requerimiento de agua se tiene, consumiendo en promedio 64 m³ por evento, resultando en una demanda anual de aproximadamente 1,443 m³, considerando demanda extrema de agua anual (Romero, 2017).

3.3.- Determinación de los puntos de muestreo.

Para este estudio, se establecieron dos puntos de muestreo los cuales se identificaron como "*Fondo*" y "*Superficie*", esto se debe a que los puntos representan la ubicación de la toma de muestra. El "*Fondo*" se obtuvo mediante el uso de una manguera cuya extracción del fluido se realizó con la ayuda de una bomba. Por otro lado, la muestra denominada "*Superficie*" recuperó agua directamente, introduciendo un recipiente en la parte superficial de la cisterna.

3.4.- Período de muestreo.

El período de muestreo comprendió entre el mes de mayo de 2017 hasta enero de 2018, teniendo un total de 27 muestras de cada uno de los dos sitios antes mencionados. Los muestreos se realizaron una vez a la semana (todos los martes) a un horario fijo (11 a.m), resultando en un total de 54 muestras. Posterior a su recolección, el material colectado se transportó al Instituto de Ingeniería de la UNAM donde se almacenaron en una cámara fría a una temperatura de 4 °C hasta el momento de su análisis.

3.5.- Muestreo del agua de lluvia.

El muestreo de agua de lluvia se llevó a cabo mediante 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”*.

La norma define como muestreo a las actividades desarrolladas para obtener volúmenes de agua en un sitio determinado del sistema de abastecimiento, de tal forma que sea representativo con el propósito de evaluar características físicas, químicas, y/o bacteriológicas.

Para los análisis físicos-químicos (color, turbiedad, absorbancia UV, SST, SSD, COT, DQO, alcalinidad, pH, dureza total y al calcio) se utilizaron envases de plásticos con capacidad de un litro. En la Figura 15 se muestran los recipientes empleados, los cuales se lavaron en primera instancia con el agua a muestrear y posteriormente fueron llenados con la muestra correspondiente para el traslado de la muestra y su almacenamiento en la cámara fría a 4°C. Posteriormente, todo el material empleado para la toma de agua, así como la boquilla de la manguera se lavó con alcohol etílico. El muestreo se realizó una vez a la semana con excepción de los días en que la AMC no laboraba, o cuando se presentaba un evento en sus instalaciones.

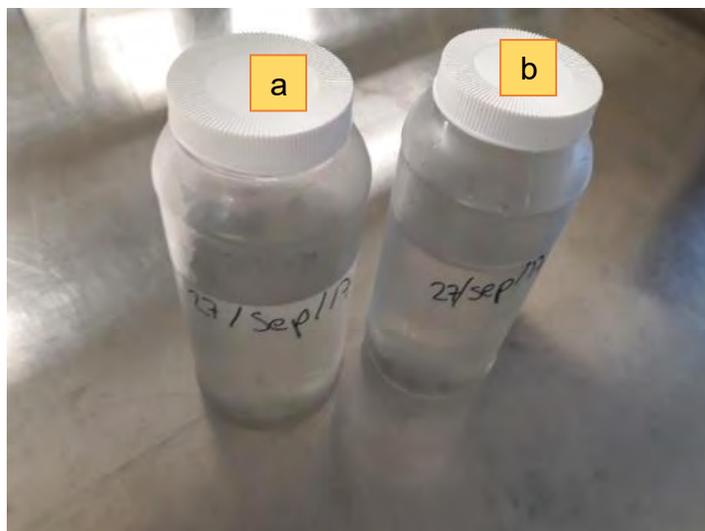


Figura 15.- Recipiente con muestra de agua de lluvia de la AMC de Superficie (a) y Fondo (b)

Para la obtención de los parámetros microbiológicos, en particular para efectuar las estimaciones de coliformes se utilizaron bolsas *WHIRL-PACK THIO-BAG* estériles, que contienen tiosulfato de sodio activo para neutralizar el cloro. En la Figura 16 se muestran las bolsas con un muestreo típico realizado en la AMC para la determinación de la carga del parámetro biológico antes mencionado.



Figura 16.- Whirl-Pak Thio-Bag con muestra de Superficie (a) y Fondo (b).

3.6.- Caracterización del agua de lluvia y material empleado.

Su caracterización se determinó en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental (LIA) del Instituto de Ingeniería de la UNAM, determinando los parámetros que se muestran en la Tabla 9, donde de manera adicional se menciona el equipo utilizado, así como las unidades correspondientes para su determinación.

Tabla 9.- Parámetros con las unidades correspondientes y equipos empleados. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Unidades	Método y Equipo	Marca del equipo
pH	Unidades de pH	Potenciométrica Potenciómetro	OAKTON PC 450
Conductividad	$\mu\text{S/cm}$		
Dureza total	mg CaCO_3/l	Titulométrica Matraz y bureta	_____
Dureza al Calcio			
Alcalinidad			
Color Aparente	Pt-Co	Colorimétrica Espectrofotómetro	DR 5000 HACH
Absorbancia UV	cm^{-1}		
Turbiedad	NUT	Colorimétrica Turbidímetro	HACH 2100 N
SDT	mg/l	Gravimétrica Capsulas de Porcelana Estufa (103 °C)	_____
SST			
COT	mg/l	Viales de digestión	DR 5000 HACH
DQO			
Coliformes Totales	UFC/100ml	SIMPLATE® Total Plate Count Color Indicator	SIMPLATE®
Coliformes Fecales			

En la Tabla 10 se describen los métodos utilizados para la determinación de los parámetros establecidos.

Tabla 10.- Métodos para la determinación de los parámetros. Fuente: Elaboración propia.

Determina	Método
Alcalinidad	<p>NMX-AA-036-SCFI-2001“Análisis de agua-determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba”</p> <p>Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater (2320)</p>
Coliformes	SIMPLATE® Total Plate Count Color Indicator
Color	<p>NMX-AA-045-SCFI-2001” Análisis de agua-determinación de color platino cobalto en aguas nacionales, residuales y residuales tratadas-método de prueba”</p> <p>Método estándar de Platino-Cobalto.</p>
COT	<i>Water Analysis Handbook</i> (método directo 10128)
Durezas	<p>NMX-AA-072-SCFI-2001“Análisis de agua-determinación de dureza total en aguas naturales,residuales y resifuales tratadas-Método de prueba”.</p> <p>Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater (3500)</p>
DQO	<i>Water Analysis Handbook</i> (método de la digestión 8000)
pH	NMX-AA-008-SCFI-2016”Análisis de agua-medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba”
sólidos	NMX-AA-034-SCFI-2015“Análisis de agua-medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba”,
Turbiedad	NMX-AA-038-SCFI-2001”Análisis de agua-determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba”

En el ANEXO 1 se detallan las técnicas empleadas para la determinación de los parámetros físico-químicos y biológicos.

3.7.- Prueba de hipótesis.

Se utilizó una prueba de hipótesis para verificar si hay diferencias significativas en la calidad entre los puntos de muestreo, se empleó la distribución t de Student ya que se tiene muestras menores a 30 datos.

Con un nivel de significancia de:

$$\alpha = 0.01$$

La anterior fue determinada según lo sugerido por Doris (2013), el cual menciona que para fines de calidad es conveniente dicho valor.

La variancia se calculó con la Ecuación 5 (cálculo de la variancia entre dos grupos de muestras):

$$Sd = \sqrt{\frac{(S_1)^2}{N_1} + \frac{(S_2)^2}{N_2}} \quad (Ec. 5)$$

Donde:

Sd= Varianza entre los grupos.

S₁= desviación estándar del grupo 1.

S₂= desviación estándar del grupo 2.

N₁= tamaño de la muestra del grupo 1.

N₂= tamaño de la muestra del grupo 2.

Para la determinación de la t se empleó la Ecuación 6 (Determinación de t)

$$t = \frac{(\bar{x}_1 + \bar{x}_2)}{Sd} \quad (Ec. 6)$$

Donde:

\bar{x}_1 =promedio del grupo 1.

\bar{x}_2 = promedio del grupo 2.

Sd= varianza entre las muestras.

Para la determinación de los grados de libertad (GL) se empleó la Ecuación 7 (Grados de libertad entre grupos).

$$GL = (M_1 + M_2) - 2 \quad (Ec. 7)$$

Donde:

GL= grados de libertad.

M_1 = tamaño de la muestra 1.

M_2 = Tamaño de la muestra 2.

CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.- Comparación de demanda anual de agua con la captación promedio anual.

El sistema de captación anual promedio existente en la AMC registró un total de 1486.34 m³, mientras que la demanda anual de la academia corresponde a 1443.2 m³, que supera en un 3%, correspondiente a 43.14 m³. Lo anterior evidencia que el sistema de tipo SCALL es capaz de abastecer en su totalidad a la academia para la realización de sus actividades.

Por otro lado, el análisis mensual de agua captada (Figura 17) muestra el volumen de agua captada mensualmente promedio con respecto a la demanda mensual de la institución. En ella es posible observar que la oferta no es constante. Para el periodo comprendido entre octubre y mayo la demanda supera al volumen ofertado en un 16%, hasta 98%. Por otro lado, el resto de los meses se supera la oferta hasta en un 92%. No obstante, dicha oferta es capaz de cubrir la necesidad de insumo de agua en todos los casos. De manera adicional, para este estudio se consideró una demanda constante mensual de 120 m³.

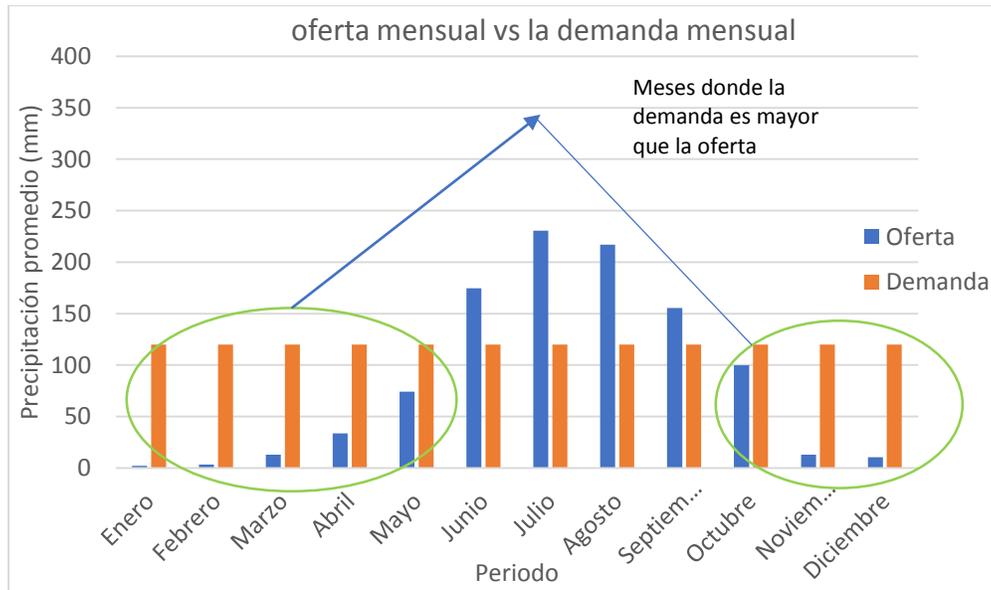


Figura 17.- Demanda mensual VS el volumen de captación mensual. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, el SCALL sólo satisface el periodo de mayo-octubre. Sin embargo, omitiendo los meses donde no se laboran en la AMC, es factible que el sistema de almacenamiento sea suficiente para satisfacer dicha demanda en algunos periodos. Por otro lado, en caso de contar con una mayor demanda de agua derivada de una mayor cantidad de eventos al interior del predio, se podría buscar otra alternativa para cubrirla. No obstante, en caso de optar por “pipas” para su abastecimiento es menor con el hecho de emplear el agua contenida en la cisterna, donde dicha estrategia disminuye los costos operacionales de la academia.

4.1.- Calidad de agua de lluvia en el sistema de captación.

Para una mayor comprensión de los resultados se optó por el uso de gráficas de cajas debido a que se colectaron alrededor de 54 datos por parámetro y por punto de muestro, con lo que se resumió su comportamiento tomando en cuenta todas las mediciones obtenidas en la experimentación. Éste tipo de gráficas muestran el mínimo, el máximo y la desviación estándar para así poder hacer una comparativa de la calidad del agua que se tienen en el “Fondo” y la “Superficie” para determinar cuál sería el punto óptimo para establecer un sistema de potabilización.

Los resultados para turbiedad, color verdadero, absorbancia UV, COT, DQO, coliformes totales y fecales evidencian un comportamiento constante, mientras que la turbidez, color, absorbancia UV y DQO poseen mayor variabilidad a lo largo del tiempo en ambos puntos de muestreo, tal como se muestra en la Figura 18.

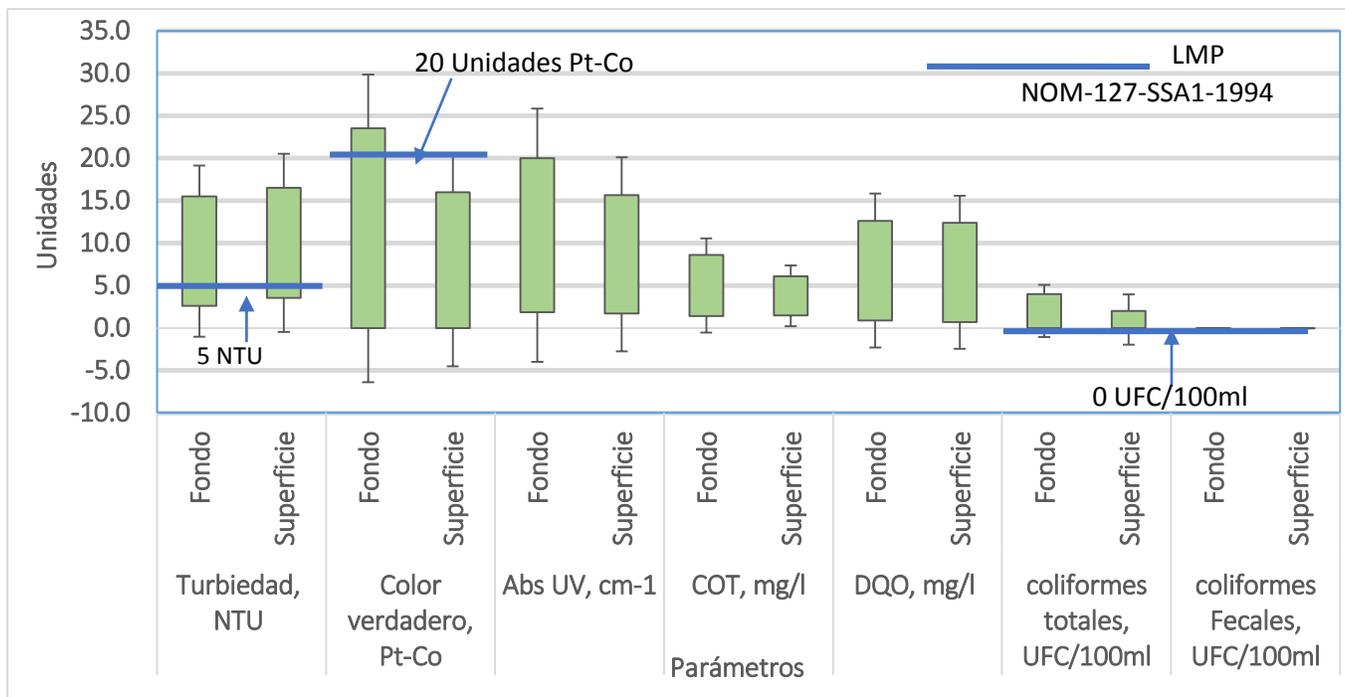


Figura 18.- Datos de turbiedad, color, Abs, COT, DQO, coliformes fecales y totales. Fuente: Elaboración propia.

En la turbiedad (Figura 19 Turbidímetro HACH 2100 N para la determinación de turbiedad) se encontró un aumento del 6% en la “Superficie” con respecto al “Fondo”. No obstante, éste parámetro no cumple con la norma en ambos puntos de muestreo ya que los valores están sobre los LMP establecidos por la norma (NOM-127-SSA1-1994), la cual señala un valor de 5 NTU. Dicha variabilidad se atribuye a la materia en suspensión o a sólidos suspendidos (LENNTECH, 2017). En este caso, posiblemente se tengan partículas en suspensión con velocidad de sedimentación baja las cuales al momento del muestreo aun estén en el proceso (Azario, *et al.*, 2004), de igual manera es posible que se re-suspendan al momento de la descarga del agua de lluvia, haciendo que los valores en la “Superficie” sean un poco elevados en comparación de los valores del “Fondo” (Cohim, *et al.*, 2015).

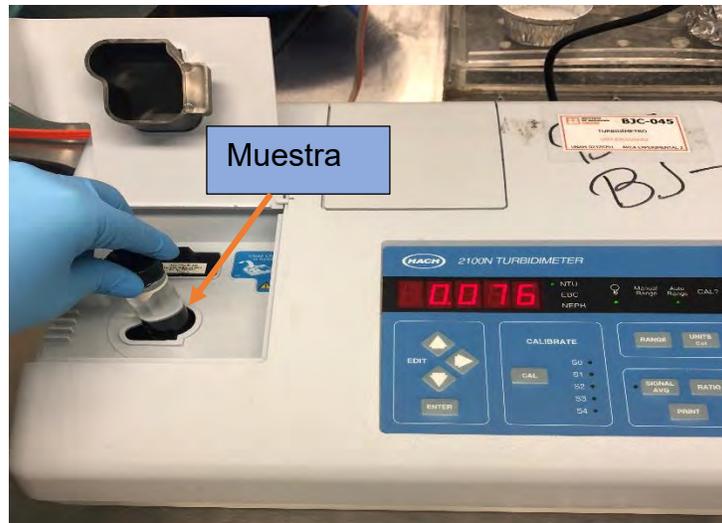


Figura 19.- Turbidímetro HACH 2100 N para la determinación de turbiedad de muestra de agua recuperada de la AMC.

Por otro lado, la absorbancia UV (Figura 20 Espectrofotómetro DR 5000), se obtuvo un incremento en el “Fondo” del 28% con respecto a la “Superficie”. Dicha variabilidad entre los puntos de muestreo sugiere ser consecuencia a la concentración de sólidos sedimentables que se tiene, ya que la absorbancia se fundamenta en la detección de carbono disuelto con dobles enlaces (HACH, 2016).

Lo anterior indica la presencia de materia orgánica e inorgánica (tierra, polvo, insectos muertos, pequeñas hojas, Ca^{2+} , Mg^{2+} , etc) la cual se refleja en la evaluación del color (Figura 17 Espectrofotómetro DR 5000), y se observó un incremento del 47% en el “Fondo” con respecto a la “Superficie”, donde la “Superficie” si cumple con los valores establecidos por la norma (20 Pt/Co). Por el contrario, el “Fondo” no cumple en un punto al registrarse 23 Pt/Co, donde dichos valores sugieren ser consecuencia de la presencia de la naturaleza de sólidos sedimentados (Galvín, 2008).



Figura 20.- Espectrofotómetro DR 5000 para la determinación de absorbancia UV y color de las muestras recuperadas de la AMC.

La COT y DQO (Figura 21) son parámetros de particular relevancia dentro del concepto de calidad, ya que en ellos se indica la cantidad de materia orgánica contenida. De manera adicional es importante, ya que el carbono orgánico reacciona con los compuestos químicos que se utilizan para la desinfección como el Hipoclorito de Sodio (NaClO), y forman subproductos de la desinfección que pueden ser potencialmente cancerígenos (HACH, 2015). En este estudio se tiene un incremento del COT 41% en el “Fondo” con respecto a la “Superficie”. Por otro lado, otro parámetro de relevancia que representa la cantidad de oxígeno que es consumida por las sustancias contaminantes que están en el agua durante cierto tiempo, ya sean orgánicas o inorgánicas (HANNA, 2018) se denomina DQO, la cual evidenció un incremento del 2% en el “Fondo” con respecto a la “Superficie”.

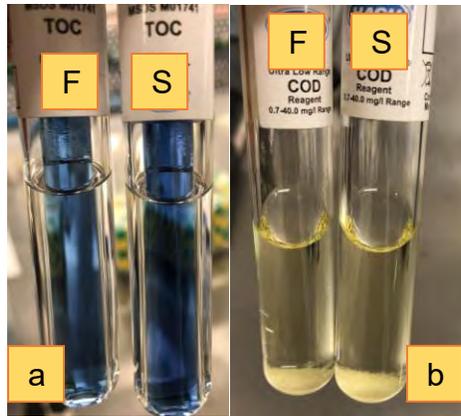


Figura 21.- Determinación experimental de COT(a) y DQO(b), donde “F” es el “Fondo” y “S” la “Superficie”.

Los sedimentos generalmente son sólidos de tierra, polvo, materia orgánica y metales pesados. Por lo mencionado anteriormente, el fondo del tanque es donde se encuentra el agua más sucia y en la superficie la más limpia (T. Abbasi y S.A Abbasi, 2011).

Por otro lado, la evaluación de la carga biológica a través de la estimación de coliformes totales evidenciaron 4 UFC en “Fondo” y 2 en “Superficie”, lo cual corresponde al doble de UFC “Superficie”, esto debido a que, en los sólidos sedimentados, pueden contener nutrientes que pueden proveer el crecimiento de bacterias (Cohim, *et al.*, 2015). Lo anterior sugiere ser originado por la disposición del agua, ya que la naturaleza de los microorganismos resulta ser principalmente de origen ambiental como las condiciones climatológicas prevaletentes como el viento (Gwenzi, *et al.*, 2015; A. Evans, *et al.*, 2005). No obstante, las estimaciones coliformes totales corresponden a un indicador potencial para identificar un sistema eficiente de tratamiento de agua (CWC, 2017). Por otro lado, la presencia de coliformes fecales si constituyen un parámetro de sumo cuidado, ya que corresponden a microorganismos potencialmente patógenos debido a su procedencia fecal. Sin embargo, en el presente estudio no fueron registrados coliformes fecales de acuerdo a la técnica empleada SIMPLATE® Total Plate Count Color Indicator cuya validación es *AOAC Official Method 2002.07* En la Figura 22 se observa una muestra preparada con el método indicado. Su ausencia indica ser consecuencia de la combinación de fenómenos de desinfección solar y las

condiciones ambientales no favorecedoras (Naddeo, *et al.*, 2013) ya que la exposición de altos niveles de rayos UV y la presencia de oxígeno tiene una acción biocida (Cohim, *et al.*, 2015), tal como se referencia en un estudio en Suiza, en el cual se encontró que para inactivar la presencia de *E. coli* se requirió de un tiempo de exposición de cinco horas a una temperatura ambiente (Bravo, 1998).



Figura 22.- Determinación de coliformes, método Simplate.

La Figura 23 muestra los resultados obtenidos de SDT, dureza total y alcalinidad del agua, de los cuales los SDT y la dureza total presentan una variabilidad en ambos puntos de muestreo.

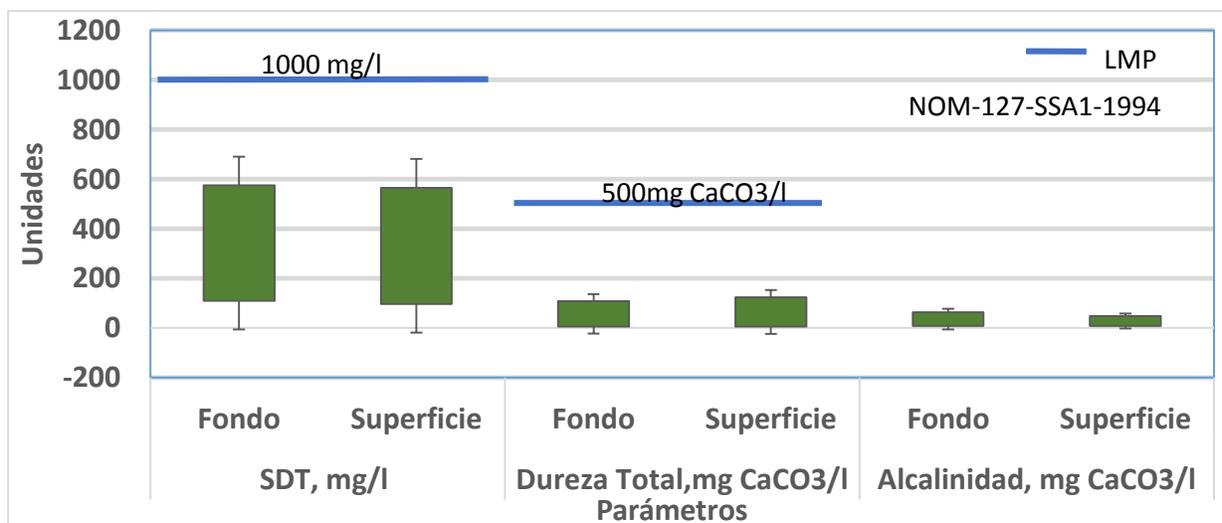


Figura 23.- Datos de SDT, dureza total y alcalinidad. Fuente: Elaboración propia.

Los SDT evidencian un incremento en el “Fondo” del 2% con respecto a la “Superficie”, donde su existencia corresponde principalmente a las sales inorgánicas disueltas, las cuales pudieran haber sido arrastradas desde el sistema de captación de agua de lluvia. Estudios demuestran que las grandes concentraciones de sólidos a menudo son detectadas durante eventos de baja lluvia precedidos de largos periodos de sequía por deposición atmosférica (Gwenzi, *et al.*, 2015).

Por otra parte, se puede observar que la dureza total presenta valores similares en el sistema, que de manera adicional cumple en ambos casos con los LMP que establece la norma correspondiente a 500 mg CaCO₃/l. Esta baja dureza, se le atribuye a que el agua de lluvia no toca ninguna formación geológica o alguna otra superficie que contenga minerales de calcio y/o magnesio (Rodríguez, 2010).

En la figura 24 se muestra el viraje, donde el color azul representa la determinación de la dureza total cuando el EDTA se acompleja con los iones Ca²⁺ y Mg²⁺.



Figura 24.- Determinación de dureza total por cambio de color de rosa a azul mediante titulación de EDTA.

Por último, el análisis de la alcalinidad mostró un incremento en el “Fondo” del 33% con respecto a la “Superficie”, la cual se constituye principalmente por la presencia de hidróxidos, bicarbonatos y carbonatos presentes en el agua. Para agua potable, los valores de alcalinidad oscilan entre 50 y 200 mg/l, el principal efecto de una

concentración mayor a 200 mg/l de alcalinidad es la reacción con ciertos cationes como: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ y NH_4^+ que se encuentran en el agua provocando precipitados no deseados en las tuberías. Las alcalinidades inferiores a 20 mg/l son propensas a la contaminación al no tener la capacidad para oponerse a las modificaciones que generen las disminuciones de pH (López, 2016).

En la Figura 25 se aprecia el viraje, donde el color naranja representa la determinación de la alcalinidad. El cambio de color se debe al cambio de pH, el color amarillo representa un pH básico, neutro y el naranja un pH entre 3.1 y 4.4



Figura 25.- Determinación de alcalinidad por cambio de color de amarillo a naranja mediante titulación de H_2SO_4 .

4.2.- Calidad del agua respecto al tiempo de almacenamiento y su comparativa con los valores normados.

En el siguiente apartado se muestra el comportamiento de los parámetros que se encuentran normados (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*”) a lo largo del periodo de almacenamiento.

En la Figura 26 se presentan valores de pH para el agua en la “Superficie” y en el “Fondo” que se encuentran dentro del intervalo establecido por la norma, la cual señala que se debe encontrar entre 6.5 y 8.5 unidades de pH. Entonces, se

evidencia que todas las estimaciones efectuadas se encuentran dentro de dicho intervalo, encontrando los valores mayores en la temporada de inicio de lluvia, disminuyendo a medida que ella progresa. Asimismo, se localiza otro un incremento y estabilización a lo largo del resto de las mediciones. En algunos estudios, el agua de lluvia es ligeramente acida, con un pH alrededor de 5.6, Bunyaratpan y Sinsupan (1983) reportan un incremento en el pH del agua de lluvia cuando es almacenado en tanques de concreto. De igual manera, de acuerdo con Despins *et al.* (2009), el contacto con un tanque de concreto puede incrementar el pH, lo cual es benéfico para la protección del sistema de distribución y la calidad química del agua, ya que minimiza el potencial de lixiviación de metales.

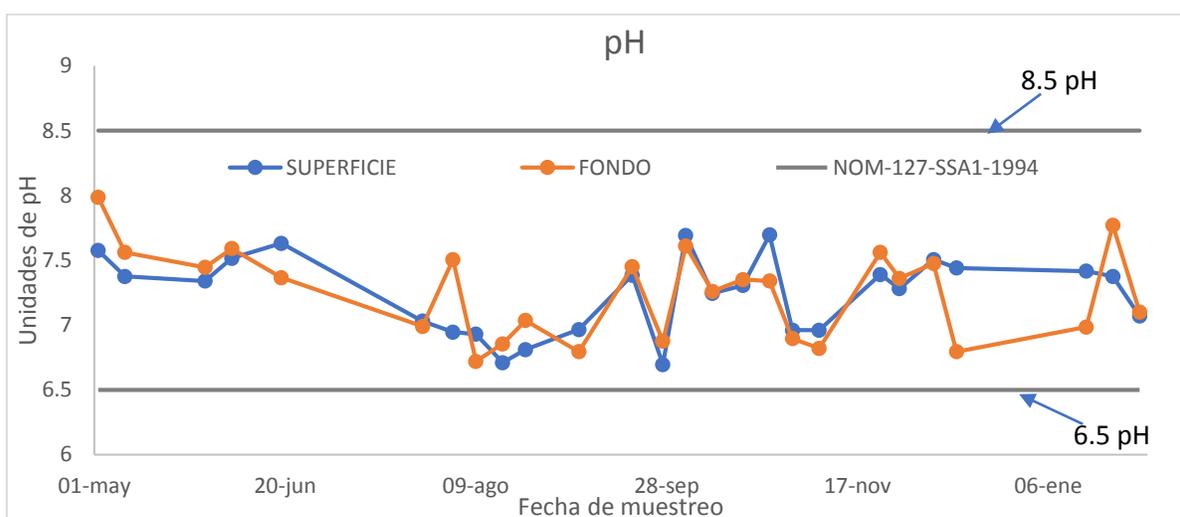


Figura 26.- Comparación de la variabilidad del pH con el LMP de la NOM-127-SSA-1994.

La Figura 27 se observa el comportamiento del color. En éste se registró un máximo de 24 unidades Pt-Co en el “Fondo”, cuyo valor corresponde al inicio de temporada de lluvia, mientras que el resto se encuentra dentro del LMP que se establece en la norma que corresponde a 20 Pt-Co. Por otro lado, se puede observar que la variación en los datos obtenidos se deba posiblemente a las lluvias no continuas, dando con esto tiempo a que se acumulen partículas de tierra, polvo y/o sales a consecuencia de los fuertes vientos presentados lo cual posee implicaciones al momento de las estimaciones (Gwenzi, *et al.*, 2015).

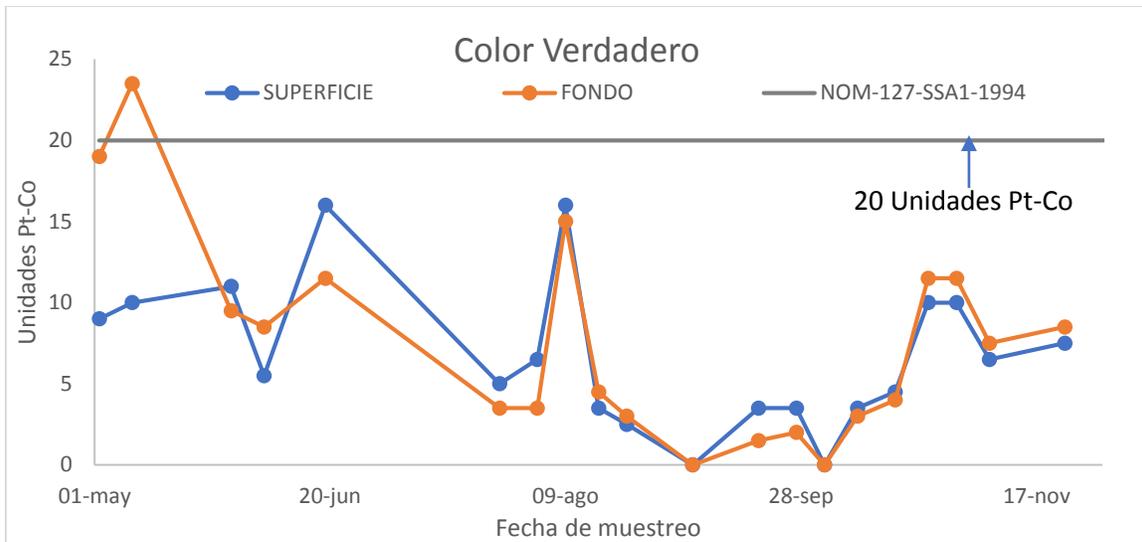


Figura 27.- Comparación de la variabilidad del Color con el LMP de la NOM-127-SSA1-1994.

Como se observa en la Figura 28, al inicio de la temporada de lluvias se registró un valor de 11 NTU para “Superficie”, mientras que para “Fondo” se tiene uno de 14 NTU, registrando entre seis y ocho NTU, manteniéndose también para el periodo comprendido entre los meses de octubre-noviembre para ambos puntos de muestreo. Por otro lado, también es observable la tendencia a incrementar alcanzando un valor de ocho NTU para “Superficie” y de 12 para “Fondo” esto a que se debe a que las materias orgánicas entre otros sólidos son menos densas que el agua e inicialmente esta flota en la superficie, pero eventualmente se satura con el agua y se sedimenta (T. Abbasi y S.A. Abbasi, 2011). Cabe hacer mención que su principal implicación es netamente estética, ya que cierto nivel de turbiedad genera rechazo en el consumo. Por otro lado, existe la posibilidad de que las partículas suspendidas ayuden a la adhesión de metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos y pesticidas (LENNTECH, 2017), además, alto nivel de turbiedad puede proteger a microorganismos de los rayos de lámpara UV para su desinfección (T. Abbasi y S.A. Abbasi, 2011).

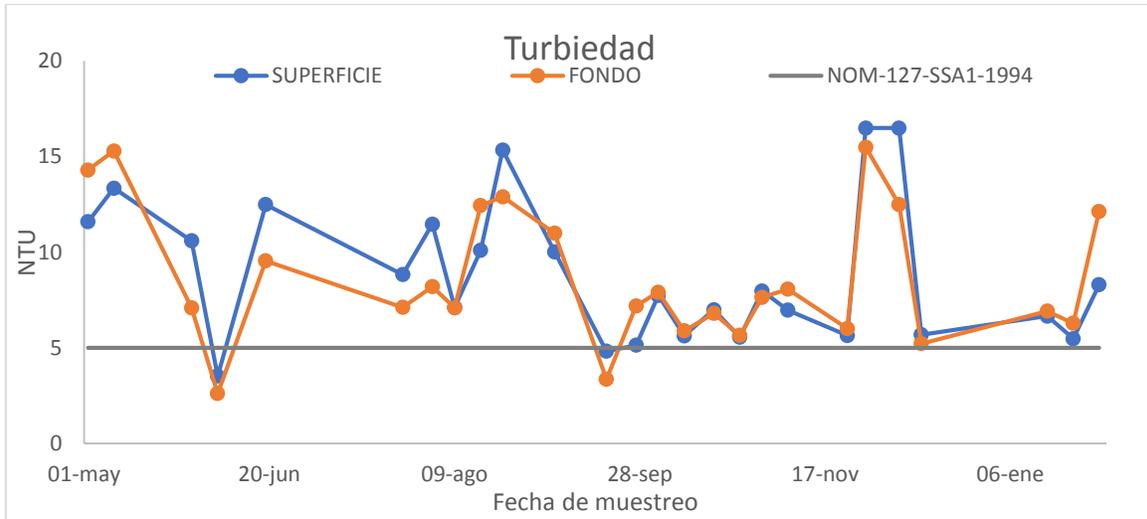


Figura 28.- Comparación de la variabilidad de la Turbidez con el LMP de la NOM-127-SSA-1994.

Con respecto a la dureza total, cuyo comportamiento se muestra en la Figura 29, se observa similar en ambos puntos de muestreo, asimismo se evidencia que este parámetro se incrementa de manera progresiva a medida que avanza la temporada de muestreo, logrando sus valores máximos durante el inicio de la temporada de lluvia con 78 mg CaCO₃/l, disminuyendo hasta su punto mínimo con 6 CaCO₃/l durante la temporada de lluvias. Esto ocurre ya que el agua de lluvia no toca ninguna formación geológica o alguna otra superficie que contengan minerales de calcio y magnesio (Rodríguez, 2010).

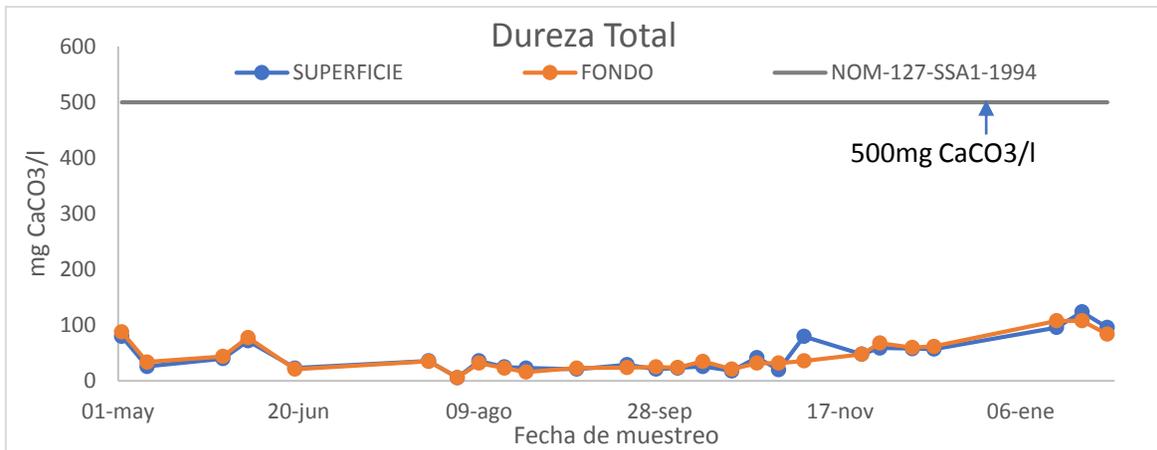


Figura 29.- Comparación de la variabilidad de la Dureza Total con el LMP de la NOM-127-SSA-1994.

Es importante mencionar que a pesar que la dureza no causa efecto a la salud, su presencia genera incrustaciones en los sistemas de conducción que obstruye y deteriora cañerías, calderas, calefones, termo tanques, lavarropas, lavavajillas, cafeteras y cualquier otro sistema o electrodoméstico (Rodríguez, 2010), siendo el bicarbonato de calcio la sal responsable al poseer una baja solubilidad en comparación con el resto de las sales en el medio.

Finalmente, la Figura 30 presenta los resultados obtenidos para los coliformes totales, los cuales presentan el doble de UFC en el “Fondo” que, en la “Superficie”, teniendo más de ellos en la temporada de estiaje. Este aumento se atribuye a que en los sólidos sedimentados, pueden contener nutrientes que pueden proveer el crecimiento de bacterias (Cohim, *et al.*, 2015). Por otro lado, para los coliformes fecales no se presentó una gráfica debido a que no se detectaron UFC en los puntos de muestreo.

En un SCALL, la determinación de estos dos parámetros es importante debido a que es frecuente que en los techos existan las heces de animales como aves y ratas siendo la principal fuente de contaminación por coliformes fecales (INTA, 2017). Las heces de las aves en el agua de lluvia pueden transmitir enfermedades como Salmonelosis (*Salmonella typhimurinum*) y Colibacilos (causada por una infección de *E. coli*) (Gaskin, *et al.*, 2001), mientras que las ratas pueden transmitir Salmonelosis (*Salmonella typhimurinum*), Leptospirosis (*Leptospira icterohaemorrhagiae*), Coriomeningitis Linfocítico (*Arenavirus*) y Síndrome hemorrágico renal (*Hantavirus*) (Picco, 2003), por mencionar algunos padecimientos. Sin embargo, las determinaciones de estos microorganismos no estaban en los alcances del proyecto.

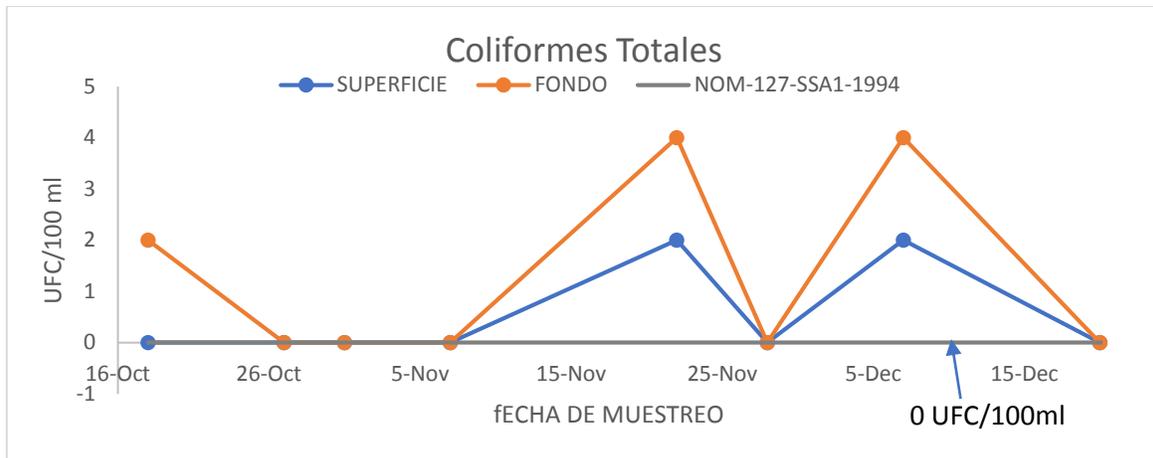


Figura 30.- Comparación de la variabilidad de los Coliformes Totales con el LMP de NOM-127-SSA-1994.

4.3.- Aplicación de la prueba de hipótesis a los resultados.

La Tabla 11 se recapitula el análisis estadístico efectuado, para evidenciar la existencia de una diferencia significativa en la calidad entre ambos puntos de muestreo, encontrando que no existe para ninguno de los parámetros evaluados, esto debido a que los resultados obtenidos en los puntos de muestreo son similares entre sí. Sin embargo, para el propósito de esta tesis que es hacer uso para su consumo, se recomienda hacer uso de la “Superficie”, debí a que se ha demostrado que en el “Fondo” se encuentra el agua más sucia por la presencia de los sólidos sedimentados (T.Abbasi y S.A Abbasi, 2011) y por la capacidad de que se generen mas bacterias (Cohim, *et al.*, 2015).

Tabla 11.- Prueba de hipótesis a los resultados obtenidos para evaluar la significancia de calidad entre los puntos de muestreo.

Parámetro	Resultado
Abs UV	no existe variabilidad
Alcalinidad	no existe variabilidad
coliformes totales	no existe variabilidad
coliformes Fecales	no existe variabilidad
Color verdadero	no existe variabilidad
COT	no existe variabilidad
Dureza Total	no existe variabilidad
DQO	no existe variabilidad
pH	no existe variabilidad
SDT	no existe variabilidad
Turbiedad	no existe variabilidad

En el anexo 2, se muestra la tabla completa de la prueba de hipótesis.

4.5.- Infografías de decisión para la captación del agua de lluvia.

Contar con infografías para la implementación y mantenimiento de un SCALL es de gran importancia para así minimizar los niveles de contaminación del agua de lluvia, además de preservar la calidad durante el tiempo de almacenamiento. También ayuda a optimizar el tiempo, esfuerzo y materiales de construcción.

Las ventajas que se tiene al usar las infografías para la captación de agua de lluvia son:

- Apoyar en el entrenamiento y capacitación de los operadores del sistema.
- Sintetizar la manera de cómo construir un SCALL, así como los materiales empleados.
- Disminuir el riesgo de contaminación del agua por mantenimiento al SCALL.
- Preservar la calidad y la cantidad de agua de lluvia.

A continuación, se presentan las infografías realizados con un estudiante del grupo de trabajo donde se realizó el trabajo de investigación, el cual fue autorizado para que se presentara como método de apoyo por considerarlo relevante al contener los principales aspectos que se deben cuidar en los SCALLs.

En la Figura 31 se presentan las consideraciones que deben realizarse durante la selección de los materiales a utilizar en la superficie de captación.

En este se destaca que es importante el área destinada para la captación, ya que con base en éste se determinará el volumen a procesar, las características de los materiales que son adecuados para captar el agua de lluvia, donde el hierro acanalado favorece al volumen de captación a comparación que el cemento plano porque su coeficiente de escurrimiento (CE) es mayor. Se prefieren aquellos con un CE mayor para tener una menor pérdida del volumen de agua que será captada.

Además, nos indica los riesgos que se tienen cuando el techo se impermeabiliza pues pueden presentar afectaciones en la calidad debido a su posible toxicidad para la salud.



SUPERFICIE DE CAPTACIÓN



Área de captación pequeña, menos agua captada.



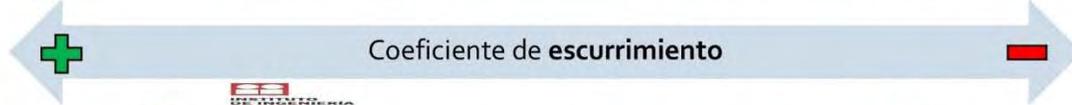
Área de captación grande, más agua captada.



✓ Materiales Aptos para Agua Potable ✓



Hierro Acanalado	Plástico acanalado	Azulejo	Tapa de fieltro limpio	Cemento plano y limpio



⊘ Materiales no Aptos para Agua Potable ⊘

Tejas de asbesto cemento	Asfalto	Paja	Pinturas tóxicas	Impermeabilizante con plomo

ELABORÓ: C. Emmanuel Kinich Sandoval García y Noe Bello Tepectzin REVISÓ: Ing. Marina Mautner AUTORIZÓ: Dra. Alma Concepción Chávez Mejía

Figura 31.- Superficie de captación.

En la Figura 32 se presentan los materiales existentes para el sistema de recolección y distribución de agua de los cuales se recomienda usar el metal (principalmente cobre o aluminio) y PVC. El emplear PVC es más económico, sin embargo, se debe considerar el empleo de un recubrimiento para proteger de los rayos UV, ya que la intemperización puede ocasionar su ruptura o agrietamiento (Guzmán Ruiz, 2014). Por otro lado, el cobre tiene un costo elevado en comparación con los otros materiales. Sin embargo, es capaz de soportar altas temperaturas sin alterar su composición, además de que es resistente a la intemperización y es capaz de inhibir el crecimiento de microorganismos (virus, bacterias, protozoarios y hongos) debido a su capacidad biocida (NACOBRE, 2017).

No obstante, la utilización de materiales regionales impacta directamente en la disminución del costo del sistema. Asimismo, zonas marginadas o de escasos recursos pueden optar por materiales alternativos, como bambú o carrizos, aunque su naturaleza puede promover la formación de microorganismos. No obstante, con un paso de desinfección es eliminado el potencial riesgo que presentan.

Se recomienda que las formas de las canaletas sean cuadradas, rectangulares o semicirculares y por lo menos con cinco o seis pulgadas de ancho. Una de las orillas del canal debe ser más alta que la orilla de la azotea y tener guardas para evitar salpicado en los valles de una azotea. Las pendientes deben de ser de 1/16 a 1/4 de pulgada por cada 10 pies de canal y ser instaladas de acuerdo a los manuales de colgantes y sección de conexión (aproximadamente una abrazadera cada 30 pulgadas). Un material típicamente usado desde una bajante a un tanque de almacenamiento es un tubo de tres a cuatro pulgadas de tubería de PVC calibre 40 (Levario, 2007). Por último, se muestra un ejemplo de un SCALL con las dimensiones de una casa, donde se ejemplifica la distribución del agua de lluvia en el sistema de captación, así como el porcentaje de captación de agua de lluvia.



SISTEMA DE RECOLECCIÓN Y DISTRIBUCIÓN



Materiales



Metal

- Caro
- Duradero
- Resistente
- Se le puede dar la forma deseada uniéndolo láminas



Plástico (PVC)

- Deben ser protegidos de la luz solar
- Fáciles de instalar y reparar



Madera, bambú, hojas de plátano

- Barato o gratis en algunos casos
- Poco durables (se pudren, tiene fugas)
- Formación de bacterias



Cerámica

- Poco comunes
- Frágil cuando se caiga

Forma



Redondeado

- Prefabricados
- El tamaño disponible puede ser más grande que lo que se requiere



Rectangular

- Fáciles de hacer en sitio con las dimensiones adecuadas
- No se bloquean fácilmente

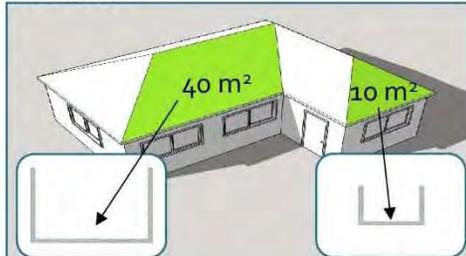


Forma de V

- Hecho en sitio
- Eficientes
- Se bloquea fácilmente

Dimensiones

Canaletas



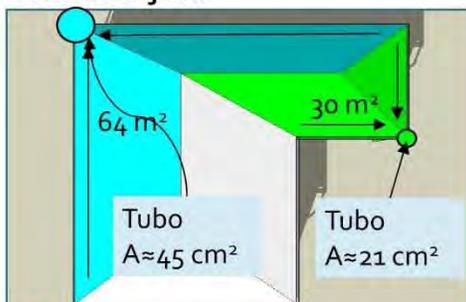
Área de aproximadamente 0.8 cm² por m² de superficie que descarga en ella. Mínimo 7.5 cm de ancho en la parte superior.

Pendiente



Más o menos de 1%. La canaleta desciende 1 centímetro por cada metro de longitud

Tubo de bajada



Área de aproximadamente 0.7 cm² por cada m² que descarga en ella.

ELABORÓ: C. Emmanuel Kinich Sandoval García y Noe Bello Tepectzin

REVISÓ: Ing. Marina Mautner

AUTORIZÓ: Dra. Alma Concepción Chávez Mejía



Figura 32.- Sistemas de recolección y distribución.

La Figura 33 contiene los tipos de tanques de almacenamiento que pueden utilizarse en los SCALLs. Establece los aspectos a considerar si se opta por tanques circulares y rectangulares, haciendo hincapié en el tanque circular, ya que requiere de menos material para su construcción y una mayor resistencia. Por otro lado, la selección del material para la fabricación del tanque de almacenamiento tiene un impacto en costo, durabilidad e infraestructura necesaria para su instalación. De ellos, el de menor costo es el de plástico y el más es el de metal. Sin embargo, los más comunes son los de concretos subterráneos.



TANQUE DE ALMACENAMIENTO



FORMA DE LOS TANQUES

(Se recomienda el circular)



Forma Circular

Requiere menos material para un mismo volumen de almacenamiento

Mayor resistencia

Forma Rectangular

Requiere más material para un mismo volumen de almacenamiento

Menor resistencia

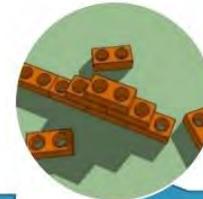
MATERIALES RECOMENDADOS PARA EL ALMACENAMIENTO



Concreto armado



Metal



Bloques de enclavamiento



Fibra de vidrio



Ladrillos



Plástico



Bloques de tierra comprimida



Madera



Ferrocemento.
No usarlo en tanques subterráneos en suelo arcilloso.

ELABORÓ: C. Emmanuel Kinich Sandoval García y
Noé Bello Tepectzin

REVISÓ: Ing. Marina Mautner

AUTORIZÓ: Dra. Alma Concepción Chávez Mejía

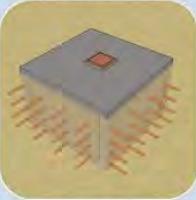
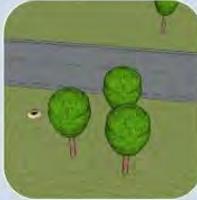
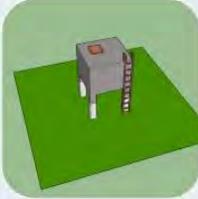


Figura 33.- Tanques de almacenamiento.

En la Figura 34 se presentan las ventajas y desventajas de optar por el uso de un tanque subterráneo con respecto a uno superficial.

Un tanque en el subsuelo suele ser más económico en su implementación, sin embargo, requiere una bomba para poder extraer el agua. Por lo que debe considerarse en el balance económico (implementación y mantenimiento respectivo). Además, es más difícil detectar algún daño.

Por otro lado, en el tanque superficial se puede detectar fácilmente un daño en el sistema. Asimismo, no es necesario un equipo adicional para obtener el agua, ya que se puede obtener mediante gravedad o con un grifo. Dentro de las desventajas se encuentran los costos, siendo mayor si se debe considerar una base para el tanque y el incremento de la susceptibilidad a daños por la exposición al ambiente.

 		<h1>TANQUE DE ALMACENAMIENTO</h1>			
	Costo	Factores que debe resistir	Aprovechamiento del agua	Daños	Espacio
<p>Tanque subterráneo</p> 	<p>Menor</p> 	<p>Presiones del suelo Agua subterránea. El agua almacenada es susceptible a la contaminación.</p> 	<p>Se requiere de algún artefacto (cubeta, bomba, etc.)</p> 	<p>Difíciles de detectar. Causados por raíces de árboles, tránsito de vehículos, animales de madriguera, etc.</p> 	<p>Se puede ocupar el espacio sobre él</p> 
<p>Tanque superficial</p> 	<p>Mayor</p> 	<p>Exposición al medio ambiente</p> 	<p>Se puede instalar un grifo</p> 	<p>Fáciles de detectar. Se dañan más fácilmente pero también es más fácil darle mantenimiento.</p> 	<p>Requiere más espacio</p> 

ELABORÓ: C. Emmanuel Kinich Sandoval García y Noe Bello Tepectzin

REVISÓ: Ing. Marina Mautner

AUTORIZÓ: Dra. Alma Concepción Chávez Mejía



Figura 34.- Tanques de almacenamiento subterráneos y superficiales.

En la Figura 35 se habla sobre el mantenimiento que debe realizarse en los SCALLs para un buen funcionamiento y para no deteriorar la cantidad y calidad del agua de lluvia.

En el sistema de captación tiene que considerar la limpieza frecuente del área, la cual deberá encontrarse libre de hojas o algún otro sólido de gran tamaño. Además, en caso de contar con rejillas de retención de sólidos, estas deben ser verificadas y no encontrarse obstruidas. Lo anterior para que el agua tenga libre paso a los sistemas de conducción. De manera adicional deberá ser inspeccionado en busca de daños, y si lo está, deberá ser reparado a la brevedad para evitar pérdidas de volumen de captación. Si se tienen arboles cerca del área de captación, es recomendable cortar las ramas para evitar que se tengan hojas en la captación.

En el sistema de recolección y distribución deben ser revisados en busca de daños, para así evitar fugas. En caso de encontrar algún desperfecto de ésta índole, éste deberá ser atendido mediante la reparación o reemplazo de las piezas dañadas para así evitar pérdidas de volumen de agua, revisar que las canaletas estén libres de obstrucciones (hojas, piedras, polvo, etc.) para que el agua fluya libremente sobre el sistema de distribución.

Finalmente, para el sistema de almacenamiento se habla sobre un sistema subterráneo, ya que son los tanques más utilizados y además es el tipo de tanque con el que cuenta la AMC. Es recomendable que una vez al año se le proporcione mantenimiento al sistema de captación para remover los sedimentos del fondo que se acumulan durante la captación del agua de lluvia, además de limpiar y desinfectar el tanque de almacenamiento. Es necesario realizar un monitoreo continuo del nivel de agua en el interior del tanque, si muestra signos de disminución de agua considerando el gasto que se hace entonces posiblemente se tenga una fuga, la cual se tendrá que reparar para evitar futuras pérdidas de agua.



MANTENIMIENTO

Superficie de Captación (techo)



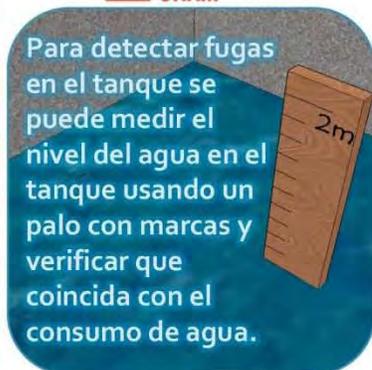
INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM



Sistema de Recolección y Distribución



Tanque de Almacenamiento



ELABORÓ: Emmanuel Kinich Sandoval García y Noe Bello Tepectzin

REVISÓ: Ing. Marina Mautner

AUTORIZÓ: Dra. Alma C. Chávez Mejía



Figura 35.- Mantenimiento de un SCALL.

CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con los resultados y análisis realizados en este trabajo, se presentan las siguientes conclusiones.

- Se determinaron valores elevados en la columna del fondo con respecto a la columna de la superficie en color, COT, absorbancia y alcalinidad. Sin embargo, no existe una variabilidad significativa en la calidad entre los puntos de muestreo de muestreo con base en la prueba de hipótesis.
- Con base en los resultados se establece que los parámetros normados en la NOM-127-SSA1-1994 cumplen con lo requerido, con excepción de turbiedad y coliformes totales.
- El hacer uso de SCALLs es una buena alternativa como abastecimiento de agua. Sin embargo, para su ingesta, es necesario pasar por una etapa de potabilización.
- Las infografías de decisión para la implementación y mantenimiento de los SCALLs constituyen una excelente herramienta ya que permite realizar estrategias generales de tipo preventivas y además de garantizar un buen funcionamiento del sistema, permitiendo lograr así la minimización de la contaminación y la obtención de un agua de buena calidad.

Recomendaciones:

- Hacer uso de la parte de la superficie, ya que en el fondo se corre el riesgo de contaminar el agua, ya que se mezclarían los sólidos sedimentados.
- Medir metales pesados como el Plomo por posible deposición atmosférica por el uso de las gasolinas. Orgánicos como plaguicidas por deposición atmosférica e hidrocarburos aromáticos por las emisiones de gasolinas, y microorganismo como *E. Coli*, *Giardia lamblia* y *Salmonella typhimurium* que son de origen fecal de animales.
- Medir de manera continua los coliformes totales y turbiedad debido a que son parámetros que limitan su uso.

- Instalar un interceptor de primeras lluvias para así disminuir la cantidad de SST que ingresan y a su vez disminuir la turbiedad.
- Un sistema de potabilización de barreras múltiples que contenga un pre-tratamiento y un sistema de desinfección.

CAPITULO 6.- REFERENCIAS.

1. A. Evans, C., J. Coombes, P. y H. Dunstan, R.(2005). Wind, rain and bacteria: the effect of waather on the mocrobial composition of roof-harvested rainwater. *Water Research*,40,37-44.
2. Abbasi, T. y Abbasi, S.(2011). *Sources of pollution in rooftop rainwater harvesting system and their control*, India,2099-2153.
3. Alexopoulos, Leotsinidis y Sazakli.(2007). Rainwater harvesting, quality assessment and utilization in Kefalonia Isaland, Greece, *Water Research*,41,2039-2047.
4. Azario, R., Marcó, L., Metzler, C. & del Carmen, M.(2004). La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales. Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay, *Hig. Sanid. Ambient*,4,72-82.
5. BANCO MUNDIAL(2013). *Agua urbana en el Valle de México: ¿Un camino verde para mañana?*, México,11-13,18-19.
6. BBC(2017). *¿Se está acabando el agual dulce en el mundo?*. Recuperado de :<http://www.bbc.com/mundo/vert-fut-39699793>.
7. Beltran, R. S.(2017). *Implementación de una Planta Piloto para la Potabilización del Agua de Lluvia*. México.
8. Bravo, L. G. M.(1998). *Desinfección solar» . Trabajo presentado en el Simposio del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) sobre calidad del agua y desinfección efectiva*. Colombia,12-19.
9. Carbotecnia(2015). *¿Qué Rayos con las UV?*.Recuperado de: <https://www.carbotecnia.info/lamparas-ultravioleta-rayos/>.

10. CDMX(2016). *Tlalpan*. Recuperado de:
<http://www.cdmx.gob.mx/delegacion/tlalpan>.
11. Charles, J. M.(2007). *Rainwater Harvesting Systems for Communities in Developing Countries*. Michigan,9-19.
12. CMCH-SCHL(2012). *Guidelines for Residential Rainwater Harvesting Systems Handbook*. Canada,2-14.
13. Cohim, E., Kalid, R. & Sánchez, A.(2015). A review on physicochemical and microbiological contamination of roof-harvested rainwater in urban areas,*Sustainability of Water Quality and Ecology*,6,119-137.
14. CONAGUA.(2005). *Sistema Cutzamala agua para millones de mexicanos*, México: CONAGUA,14.
15. CONAGUA.(2013). *Estadísticas del Agua de la Región Hidrológico-Administrativa XIII*. México: CONAGUA,74-89.
16. CONAGUA.(2015). *Programa para la Sostenibilidad de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento en Comunidades Rurales*. México: CONAGUA,2-12.
17. CONAGUA.(2017). *Estadísticas del agua en México*, México: CONAGUA,28-52.
18. CONAGUA.(2017). *Programa Nacional para Captación de Agua de Lluvia y Ecotecnias en Zonas Rurales(PROCAPTAR)*. Recuperado de:<https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/programa-nacional-para-captacion-de-agua-de-lluvia-y-ecotecnias-en-zonas-rurales-procaptar>.
19. CONAMA10.(2012). *Captación de agua de lluvia, alternativa sustentable*. México,5-14.
20. Diario Oficial de la Federación.(2013). *Norma Mexicana NMX-AA-164-DCFI-2013, Edificación sustentable-criterios y requerimientos ambientales mínimos*. México.

21. EXCELSIOR.(2017). *La situación del Agua en el Mundo*. Recuperado de:
<http://www.excelsior.com.mx/global/2017/03/22/1153440>.
22. FAO.(2013). *Captación y Almacenamiento de Agua de Lluvia Opciones Técnicas para la Agricultura Familiar en América Latina y el Caribe*. Santiago, Chile: FAO,59-75,183-192,223-255.
23. Farley, R. H.(2002). *The Relationship Between Alkalinity and pH*.
24. Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental.(2015). *Agua en el planeta*. Recuperado de: <https://agua.org.mx/en-el-planeta/>.
25. Fumigadora Continente.(2015). *Las bacterias coliformes*. Recuperado de:
<http://www.fumigacontinente.com.ar/las-bacterias-coliformes/>.
26. Galvín, M. R.(2008). *Características Físicas, Químicas y Biológicas de las Aguas*. México: EMACSA,3-24.
27. Gaskin, J., Wilson, H., Jacobo, J. y Garcia, J.(2001). *Enfermedades de las aves transmisibles a los humanos*. Florida,2-5.
28. Ghisi, E.(2008). *Parameters Influencing the Sizing of Rainwater Tanks for Use in Houses*. Springer,2381-2402.
29. Guzmán Ruiz, S. F. (2014). *Sistemas de captación de aguas pluviales adaptable a casas habitación*(tesis de pregrado).Universidad Tecnológico de la Mixteca, Oaxaca,21-39.
30. Gwenzi, W. y otros.(2015). Water quality and public health risks associated with roof rainwater harvesting system for potable supply: review and perspectives,*Sustainability of Water and Ecology*,6,107-118.
31. H2O Soluciones.(2017). *Materiales Filtrantes*. Recuperado de:
<http://www.h2osoluciones.com/materiales-filtrantes.html>.
32. HACH.(2003). *Water Analysis Handbook*. Colorado: HACH COMPANY.

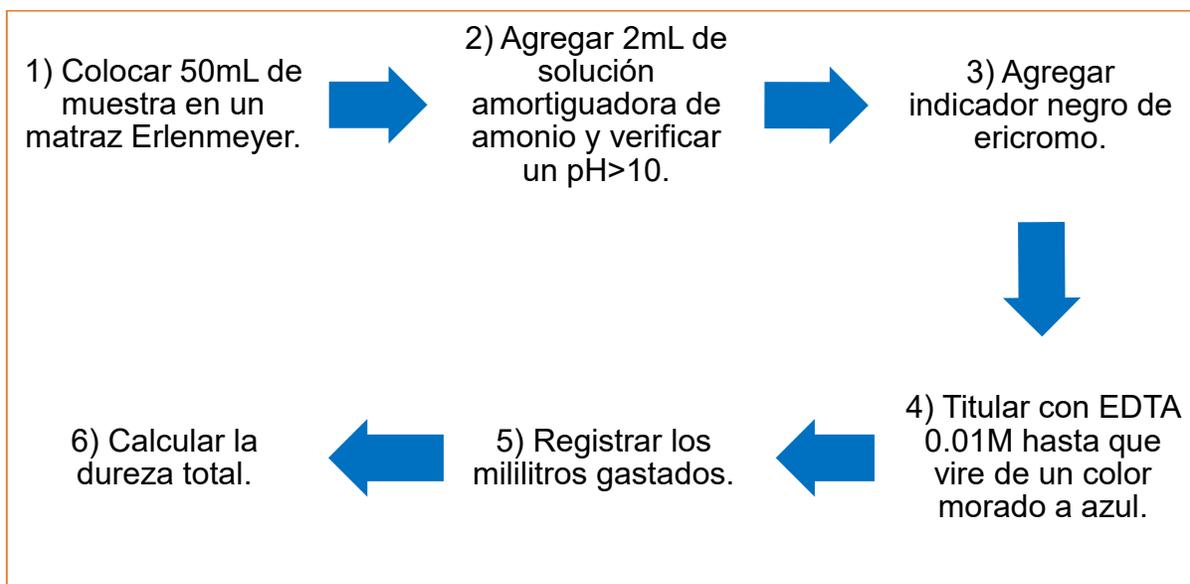
- 33.HACH.(2015). *Importancia de la medición de carbono orgánico total* Colorado: HACH COMPANY,1-4.
- 34.HACH.(2016). Absorción UV para la monitorización de sustancias orgánicas en agua potable. *Análisis de agua potable* Colorado: HACH COMPANY,1-2.
- 35.HANNA.(2018). *Demanda química de oxígeno y materia orgánica*.
- 36.Helmreich.(2008). Opportunities in Rainwater Harvesting.*Desalination,248,Alemania,118-124*.
- 37.Lancaster, B. (2008). *Rainwater Harvesting for Drylands and Beyond Volumen 2*. Tucson, Arizon: Rainsource Press,12-17.
- 38.Leite, E. y Ghisi, E.(2012). Potable Water Savings by Using Rainwater for Non-Potable Uses in House,*water,4,607-626*.
- 39.LENNTech.(2017). *Turbidez*.Recuperado de:
<https://www.lenntech.es/turbidez.htm>.
- 40.Levario, K.(2007). Grupo de análisis: captación y aprovechamiento de agua de lluvia. *Red del agua UNAM,2-38*.
- 41.López, E. P.(2016). Control de calidad en agua para consumo humano en la región occidental de Costa Rica,*Tecnología en Marcha,19(3),3-14*.
- 42.Márquez Bravo, L. G.s.f. *Desinfección solar*, Morelos,9-19.
- 43.Massol, A. (2002). *Parametros Físico-Químicos*, Puerto Rico: Universidad de Puerto Rico de Mayagez,2-17.
- 44.Mechell, J. y otros.(2010). Rainwater harvesting system planning. *AgriLIFE EXTENSION,221-231*.
- 45.Murillo, D., Martínez, L. J. y Rojas, T.(2009). *Cultura hidráulica y simbolismo mesoamericano del agua en mexico*. México: IMTA-CIESAS,25-47.

46. Mendez, C. y otros.(2011). The Effect of Roofing Material on the Quality of Harvested Rainwater, *Water Research*,45,2049-2059.
47. Naddeo, V., Scannapieco, D. y Belgiorno, V.(2013). Enhanced drinking water supply through harvested rainwater treatment, *Journal of Hydrology*,498,287-291.
48. Olivares, R. y Sandovel, R.(2008). *El Agua Potable en México*, México: ANEAS,4-27.
49. OMS.(2011). Estrategias para la gestión sin riesgos del agua potable para el consumo humano. *64 Asamblea mundial de la salud*,1-7.
50. Orellana, J.(2005). *Características del Agua Potable*,1-6.
51. Organización Panamericana de la Salud.(2004). *Guía de Diseño para Captación del Agua de Lluvia*. Lima: COSUDE,3-11.
52. Palacio Castañeda, N.(2010). *Propuesta de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia, como alternativa para el ahorro de agua potable, en la institución educativa María auxiliadora de caldas*. Medellín,24-29.
53. Pardo, C. S.(2016). *Programa de Desarrollo de la Delegación Tlalpan*. México,1-32.
54. Picco, N.(2003). *Los roedores como transmisores de enfermedades zoonóticas*,2-4.
55. PROFECO.(2000). Calidad de filtros purificadores de agua. *Revista del consumidor*, México,1-2.
56. Roa, W.(2017).UNAM y la CDMX pactan apoyo para captación de agua pluvial. *EXCELSIOR*. Recuperado de:
<http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2017/01/11/1139309>.
57. Rodríguez, S.(2010). *La Dureza del Agua*. Buenos Aires: edUTecNe,4-31.

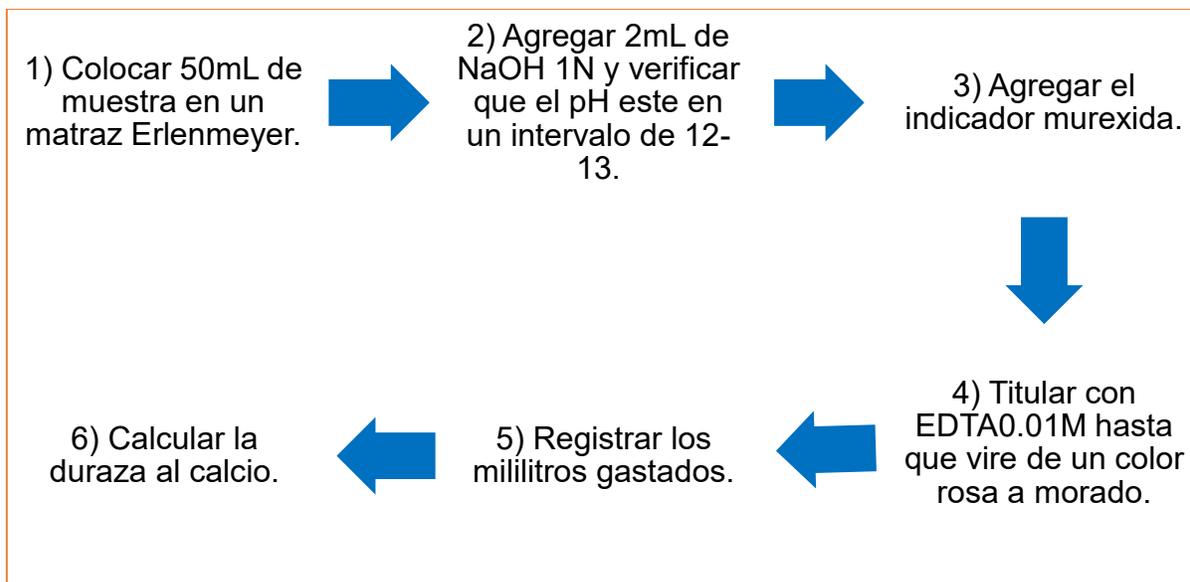
58. Romero, S. G.(2017). *Diseño de un Sistema de Captación de Agua de Lluvia en la Academia Mexicana de Ciencias*.(titulo de especialidad).Universidad Autónoma de México, México,33-39.
59. SEDESOL.(2011). *Atlas de Peligros Naturales o Riesgos de la Delegación Tlalpan,Distrito Federal 2011*. México: UNAM.7-11.
60. SEMARNAT.(2009). *Semblanza Histórica del Agua en México*. México: SEMARNAT,9-22.
61. SEMARNAT.(2015). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*. México: SEMARNAT,364-392.
62. SEMARNAT.(2016). *Manual de Oeración y Mantenimiento del Sistema de Captación de Agua de Lluvia de Cherán, Michoacán*. Jiutepec, Morelos: SEMARNAT,11-18.
63. Tinoco, C. B.(2016). *Agua Contaminada, una amenaza latente en México* [Entrevista] (27 Octubre 2016).
64. Tlalpan.(2016). *Invierte Tlalpan 55 millones de pesos para distribución de agua potable*. Recuperado de: <http://www.tlalpan.gob.mx/noticias/2203201601.php>.
65. UNESCO.(2015). *Agua para un Mundo Sostenible Datos y Cifras*. UNWATER,1-11.
66. UNESCO.(2015). *informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo 2015*: UNESCO,3-5.

ANEXO 1.- MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DEL AGUA.

Determinación de la Dureza Total.



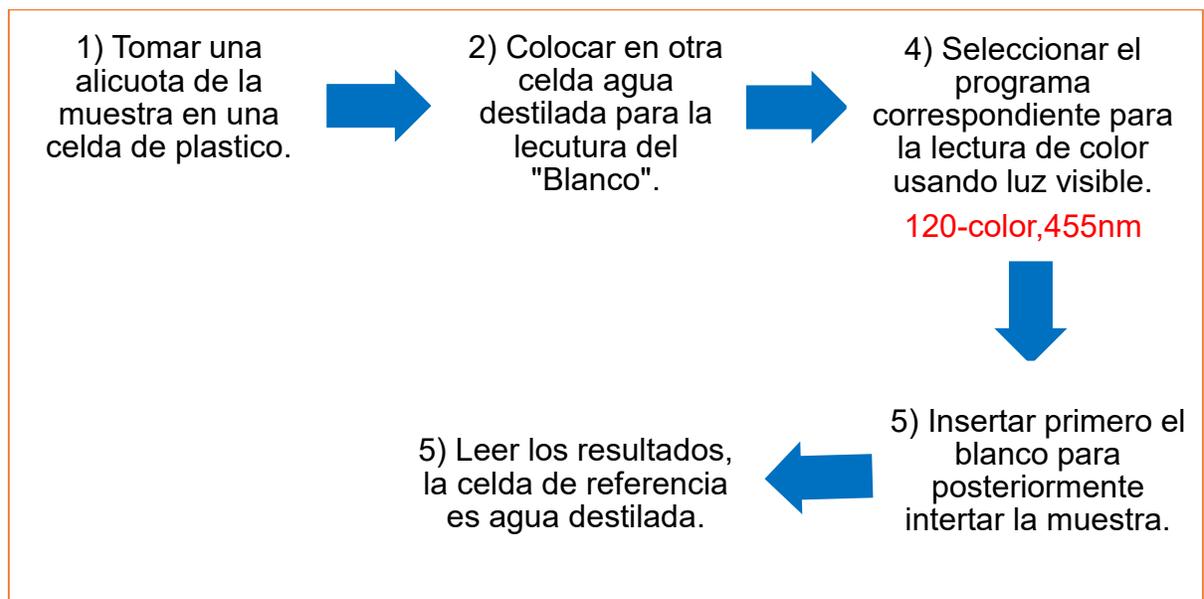
Determinación de la Dureza al Calcio.



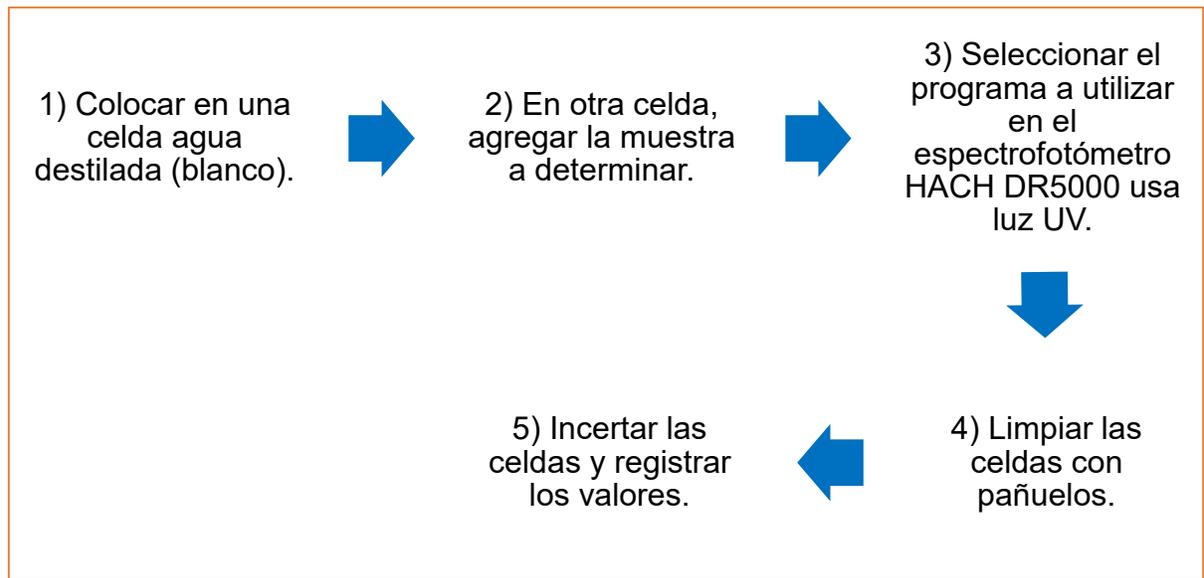
Determinación de la Alcalinidad.



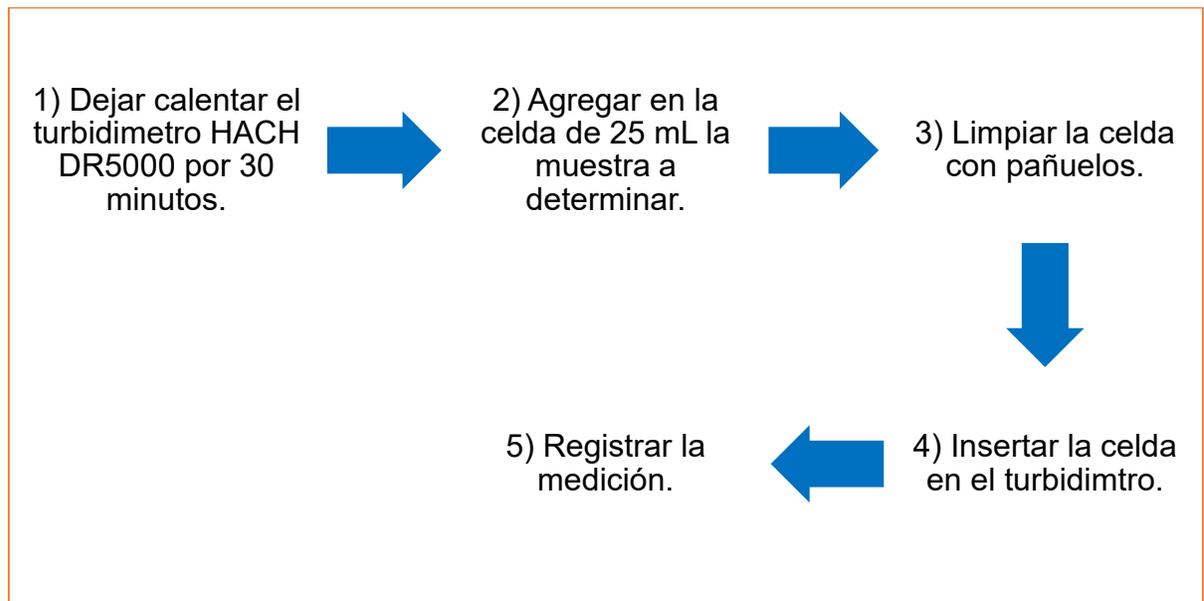
Determinación del Color.



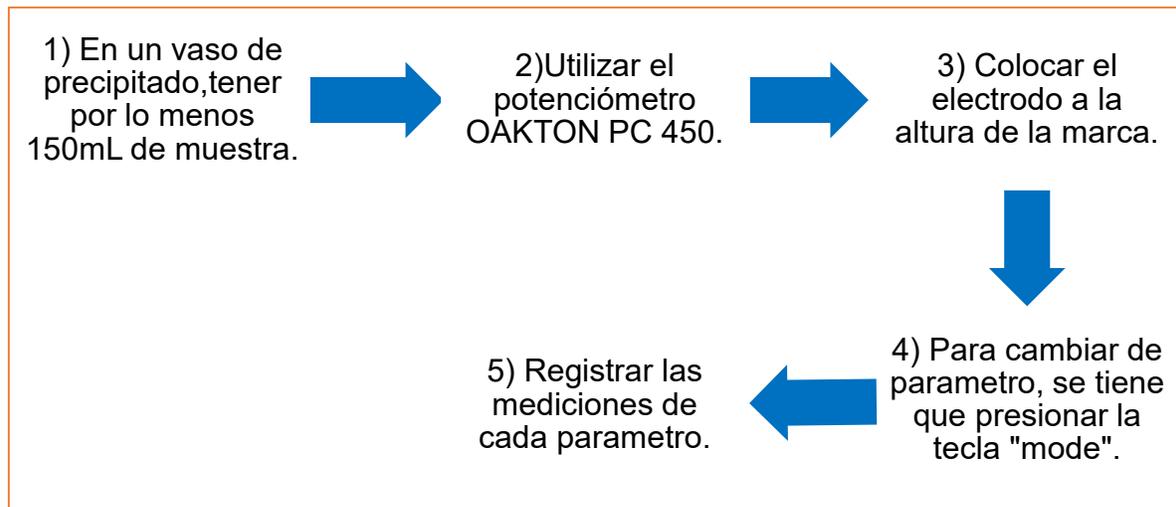
Determinación de la Absorbancia al UV.



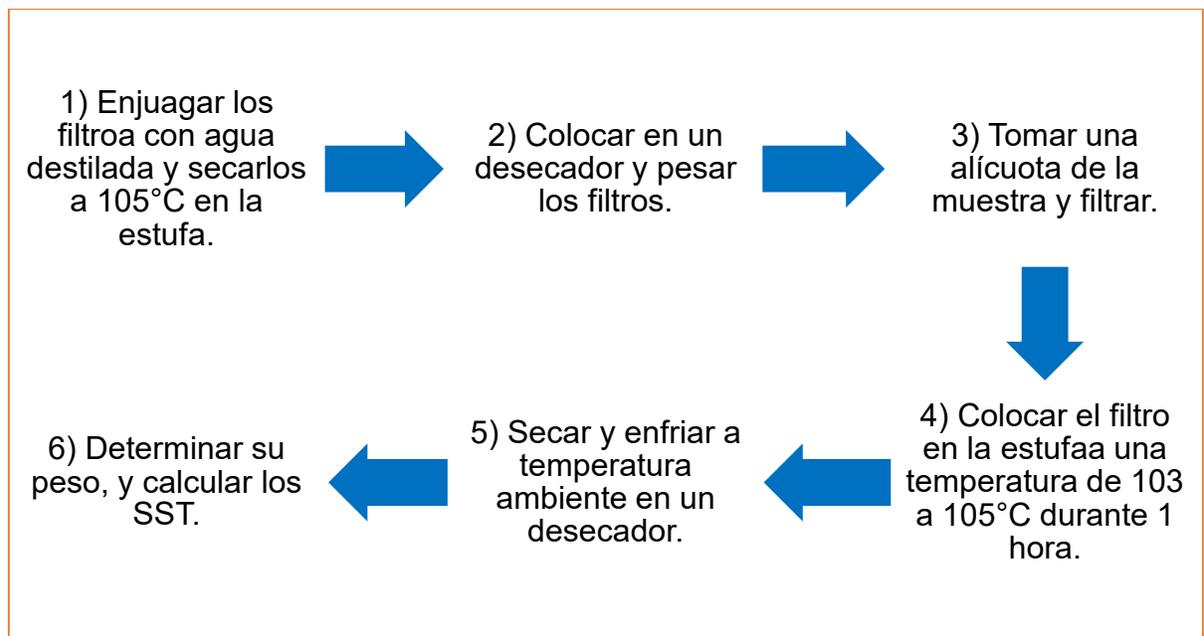
Determinación de la turbidez.



Determinación del pH y conductividad.



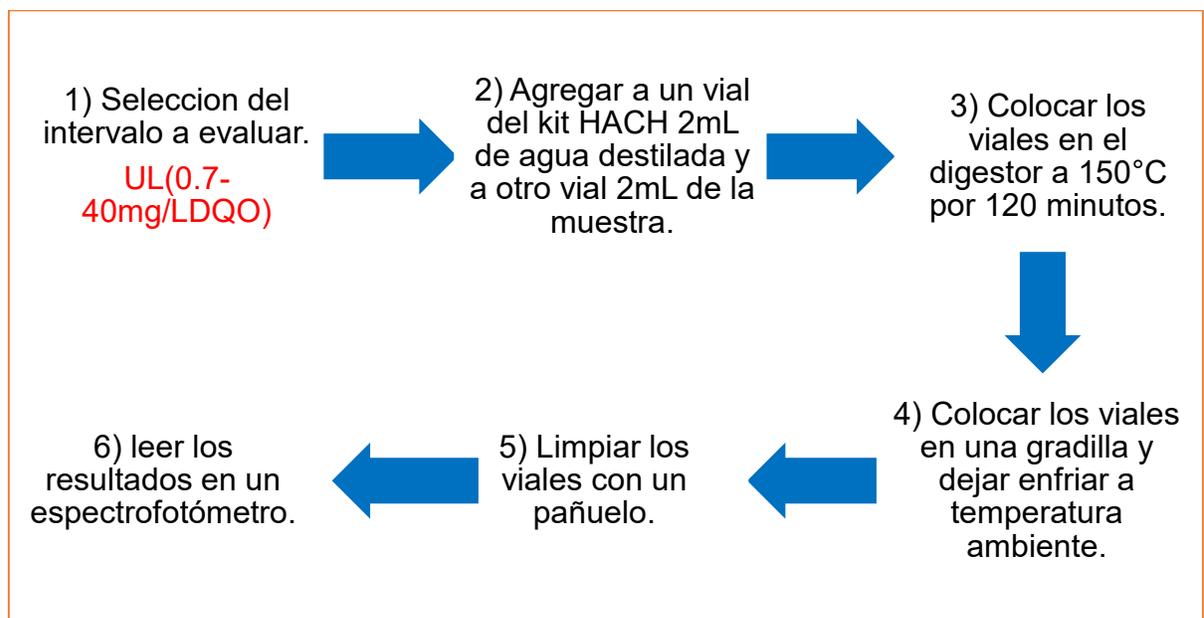
Determinación de los SST.



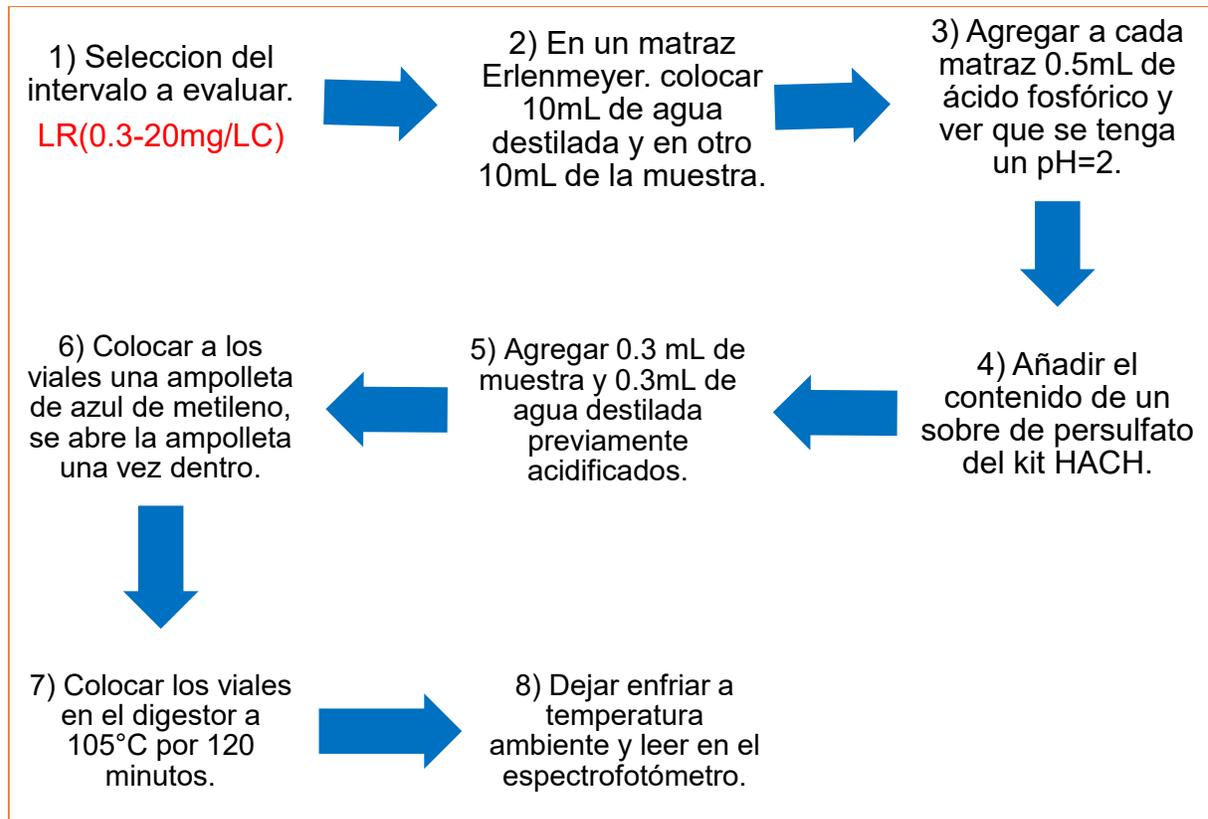
Determinación de los SDT.



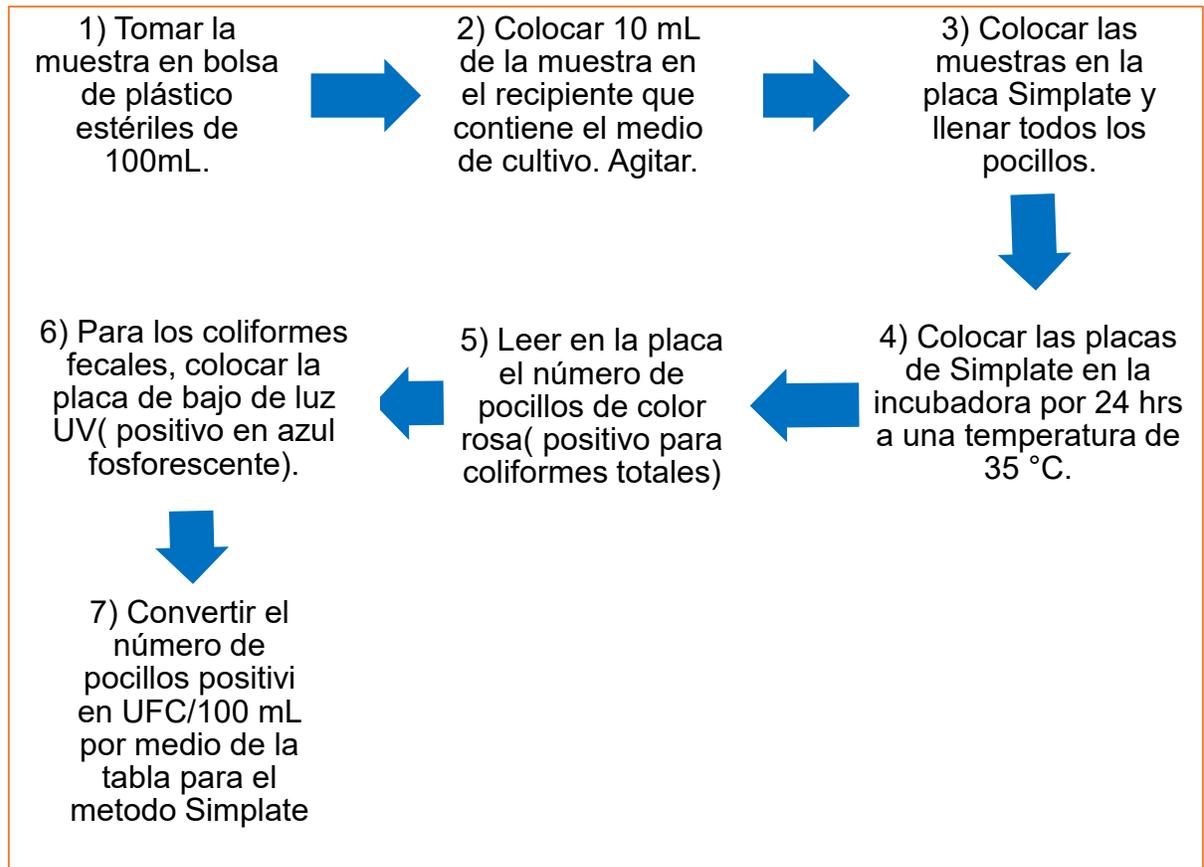
Determinación de la DQO



Determinación de la COT.



Determinación de los Coliformes Totales y Fecales.



ANEXO 2.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA PRUEBA DE HIPÓTESIS.

Tabla 12.- Análisis estadístico de T-Student.

Parámetro		Promedio	Sn	N	Sd	t calculada	t de tablas	GL	Validez
pH	Fondo	7.28	0.33	26	0.0886	0.0456	1.20165	50	no se rechaza H0
	Superficie	7.27	0.31	26					
SDT	Fondo	332.46	115.21	22	34.9333	0.7520	1.210	42	no se rechaza H0
	Superficie	306.19	116.50	22					
Turbiedad	Fondo	8.78	3.64	26	1.0626	0.3451	1.202	50	no se rechaza H0
	Superficie	9.14	4.01	26					
Color verdadero	Fondo	7.55	6.37	20	1.7462	0.4868	1.2143	38	no se rechaza H0
	Superficie	6.70	4.52	20					
Abs UV	Fondo	5.354	5.855	26	1.4435	0.3397	1.202	50	no se rechaza H0
	Superficie	4.863	4.460	26					
COT	Fondo	3.05	1.95	11	0.7031	0.3749	1.264	20	no se rechaza H0
	Superficie	2.78	1.28	11					
DQO	Fondo	3.48	3.22	11	1.3608	0.0067	1.264	20	no se rechaza H0
	Superficie	3.49	3.16	11					
Dureza Total	Fondo	44.88	28.37	26	8.0651	0.0839	1.202	50	no se rechaza H0
	Superficie	45.56	29.77	26					
Alcalinidad	Fondo	23.97	14.29	26	3.4739	0.2325	1.202	50	no se rechaza H0
	Superficie	23.17	10.46	26					
coliformes totales	Fondo	0.86	1.07	7	0.8411	0.3397	1.341	12	no se rechaza H0
	Superficie	1.14	1.95	7					
coliformes fecales	Fondo	0.00	0.00	7	0	#¡DIV/0!	1.341	12	no se rechaza H0
	Superficie	0.00	0.00	7					